ALBERT EINSTEIN s-a născut la Ulm în Germania, la 14 martie 1879. A studiat matematică şi fizică la Şcoala Politehnică Federală din Ziirich între 1896 şi 1900. în anii 1902-1908 a lucrat ca expert la Oficiul Federal de Patente din Berna si a publicat lucrări ce au atras atenția lumii ştiințifice, printre care prima lucrare despre teoria specială a relativității în 1905. în anii 1908-1914 a fost profesor de fizică teoretică la universitățile din Berna, Ziirich şi Fraga, în 1913 este ales membru al Academiei Prusiene de Științe si numit director al Institutului de Fizică al Societății „împăratul Wilhelm" din Berlin, funcție pe care o păstrează până în 1933. După publicarea teoriei generale a relativității în anii primului război mondial si confirmarea uneia dintre predicțiile ei de către expediția astronomică a Societății Regale de Științe din Londra (1919), devine cel mai cunoscut om de ştiință al vremii sale. Odată cu instaurarea regimului național-socialist, Einstein îşi dă demisia din Academia Prusacă de Ştiinţe şi părăseşte definitiv Germania, stabilindu-se la Princeton, în Statele Unite ale Americii. în ultima parte a vieții, Einstein este recunoscut nu numai drept cea mai mare autoritate din fizica teoretică, ci şi ca un mare umanist care încorporează în mod exemplar prin acțiunea lui socială si culturală, prin luările sale de poziție în problemele vieții publice spiritul libertății, al justiției sociale, respectul pentru demnitatea ființei umane. Moare la 18 aprilie 1955, la 76 de ani.

Scrierile de interes general ale lui Einstein sunt reunite în două volume: *Mein Weltbild* (1931) si *Out ofmy Later Years* (1950). în 1917, Einstein publică prima expunere a teoriei speciale si generale a relativității „pe înțelesul tuturor".

ALBERT EINSTEIN

TEORIA RELATIVITĂȚII PE ÎNȚELESUL TUTUROR

Traducere din germană de
ILIE PÂRVU

HUMANITAS
BUCUREȘTI

Coperta
IOANA DRAGOMIRESCU MARCARE
Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României
EINSTEIN, ALBERT
Teoria relativității pe înțelesul tuturor / Albert Einstein;
trad. I. Pârvu - Ed. a 4-a. - Bucureşti: Humanitas, 2005
ISBN 973-50-1068-2
I. Pârvu, Ilie (trad.)
530.12
Allgemeinverstandliche Relativitatstheorie

EDITURA HUMANITAS
Piața Presei Libere l, 013701 Bucureşti, România
tel. 021/317 18 19, fax 021/31718 24
www.humanitas .ro
Comenzi CARTE PRIN POŞTĂ: tel. 021/311 23 30,
fax 021/313 50 35, C.P.C.E. — CP 14, Bucureşti
e-mail: cpp@humanitas.ro
www.librariilehumanitas.ro
ISBN 973-50-1068-2

CUVÂNT ÎNAINTE

Scopul acestei mici cărți este de a înlesni înțelegerea cât mai exactă a teoriei relativității pentru cei care se interesează din perspectivă general-stiințifică, filozofică, de teorie, dar nu stăpânesc aparatul matematic al fizicii teoretice.* Lectura ei presupune o anume maturitate de gândire şi, în ciuda numărului mic de pagini, pretinde din partea cititorului multă răbdare si voință. Autorul si-a dat toată silința să prezinte ideile fundamentale cât mai clar şi simplu cu putință, în ordinea şi în conexiunea în care au apărut. In interesul clarității expunerii m-am văzut nevoit să mă repet adesea, fără a mai ține cont

* Fundamentele matematice ale teoriei speciale a relativității pot fi găsite în lucrările originale ale lui H.A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski apărute în editura B.G. Teubner în colecția de monografii *Fortschritte aer Mathematischen Wissenschaften* cu titlul *Das Relativitatsprinzip,* precum şi în cartea detailată a lui M. Laue Das *Relativitatsprinzip* (editată de Fr. Vieweg & Sohn, Braunschweig). Teoria generală a relativității precum și instrumentele matematice ajutătoare ale teoriei invarianților sunt tratate în broşura autorului *Die Grundlagen der allgemeinen Relativitatstheorie* (Joh. Ambr. Barth, 1916); această broşură presupune o cunoaştere aprofundată a teoriei speciale a relativității.

de eleganta expunerii, în această privință am ținut seama de sfatul teoreticianului de geniu L. Boltzmann, care spunea că eleganța trebuie lăsată în seama croitorilor şi a cizmarilor. Nu cred că am ascuns cititorilor dificultățile ce țin de natura internă a problemei. Dimpotrivă, în mod intenționat am vitregit bazele fizice empirice ale teoriei, pentru ca cititorul neinițiat în fizică să nu fie împiedicat să vadă pădurea din cauza copacilor. Fie ca această mică lucrare să aducă cât mai multor oameni câteva ore plăcute de lectură stimulatoare!

Decembrie, 1916

Albert Einstein

Completare la ediția a treia

în acest an (1918) a apărut la editura Springer un excelent manual detailat asupra teoriei generale a relativității pe care H. Weyl 1-a editat sub titlul *Raum, Zeit, Materie;* îl recomandăm cu căldură matematicienilor şi fizicienilor.

Partea întâi

DESPRE TEORIA SPECIALĂ A RELATIVITĂȚII

§1. Conținutul fizic al propozițiilor geometrice

Nu încape nici o îndoială, iubite cititor, că, în tinerețe, ai cunoscut falnicul edificiu al geometriei euclidiene, iar amintirea acestei mărețe construcții, pe ale cărei trepte înalte ai fost purtat în nenumărate ore de studiu de profesori conştiincioşi, îți inspiră mai mult respect decât plăcere; cu siguranță că această experiență din trecut te face să priveşti cu dispreț pe oricine ar îndrăzni să declare ca neadevărată chiar şi cea mai neînsemnată propoziție a acestei ştiințe. Dar acest sentiment de mândră certitudine te va părăsi de îndată ce vei fi întrebat: „Ce înțelegi prin afirmația că aceste propoziții sunt adevărate?" Iată o întrebare la care vrem .să ne oprim puțin.

Geometria porneşte de la anumite noțiuni fundamentale, cum sunt punctul, dreapta, planul, pe care suntem capabili să le corelăm cu reprezentări clare, si de la anumite propoziții simple (axiome), pe care suntem înclinați să le acceptăm ca „adevărate" pe baza acestor reprezentări. Toate celelalte

propoziții vor fi întemeiate, adică demonstrate pe baza unei metode logice, a cărei justificare suntem determinați s-o recunoaştem, pornind de la aceste axiome. O propoziție este corectă, respectiv „adevărată", dacă poate fi dedusă din axiome în maniera recunoscută. Problema „adevărului" unor propoziții geometrice individuale conduce astfel înapoi la problema „adevărului" axiomelor. Se ştie însă de multă vreme că această ultimă problemă nu este doar nerezolvabilă prin metodele geometriei; ea este, în general, fără sens. Nu ne putem întreba dacă este adevărat că prin două puncte poate trece numai o *singură* dreaptă. Putem doar spune că geometria euclidiană se ocupă cu figuri pe care ea le numeşte „drepte" şi cărora le atribuie proprietatea de a fi determinate în întregime prin două puncte ce le aparțin. Conceptul de „adevăr" nu se potriveşte enunțurilor geometriei pure, deoarece prin cuvântul „adevărat" desemnăm în ultimă instanță corespondența cu obiectele reale. Geometria însă nu se ocupă cu relația dintre conceptele ei şi obiectele experienței, ci doar cu corelațiile logice reciproce ale acestor concepte. Este uşor însă de explicat de ce ne simțim totuşi obligați să spunem că propozițiile geometriei sunt „adevărate". Conceptelor geometrice le corespund mai mult sau mai puțin exact obiecte din natură, aceasta din urmă reprezentând singura cauză a generării lor. In încercarea de a conferi edificiului ei o cât mai mare coeziune logică, geometria se îndepărtează de această origine. Obişnuința, de

exemplu, de a defini o dreaptă prin două puncte marcate pe un singur corp practic rigid este profund înrădăcinată în felul nostru de a gândi. La fel, suntem obişnuiţi să considerăm că trei puncte se află pe o linie dreaptă dacă putem face să treacă o rază vizuală prin aceste trei puncte alegând în mod convenabil punctul de vizare.

Dacă, urmând modul nostru obişnuit de a gândi, adăugăm propoziţiilor geometriei euclidiene o singură propoziţie care afirmă că la două puncte ale unui corp practic rigid corespunde întotdeauna aceeaşi distanţă (măsurată în linie dreaptă), indiferent de modificările aduse poziţiei corpului, atunci propoziţiile geometriei euclidiene devin propoziţii ce se raportează la diverse poziţii relative pe care le pot ocupa corpurile practic rigide.* Geometria astfel completată poate fi considerată o ramură a fizicii. Acum avem îndreptăţirea să ne întrebăm asupra „adevărului" propoziţiilor geometrice astfel interpretabile, deoarece ne putem întreba dacă ele corespund acelor lucruri reale pe care le-am pus în corespondenţă cu conceptele geometrice. Ceva mai puţin precis am putea spune că prin „adevărul" unei propoziţii geometrice înţelegem faptul că ea conduce la o construcţie posibilă cu rigla şi compasul.

* Prin aceasta i se pune în corespondenţă liniei drepte un obiect natural. Trei puncte ale unui corp rigid *A, B, C* se află pe o linie dreaptă atunci când, date fiind punctele *A* si C, punctul B este astfel ales, încât suma distanţelor *AB* şi *BC* să fie cea mai mică cu putinţă. Această indicaţie incompletă poate fi aici considerată ca suficientă.

Convingerea asupra „adevărului" propozițiilor geometrice în acest sens se întemeiază în mod natural exclusiv pe o experiență relativ imperfectă. Vom presupune pentru început adevărul propozițiilor geometriei pentru ca apoi, în ultima parfte a considerațiilor noastre (privind teoria generală a relativității), să vedem că aceste adevăruri nu sunt absolute si să le precizăm limitele.

§2. Sistemul de coordonate

Pe baza interpretării *fizice a* distantei pe care am indicat-o, suntem în măsură să stabilim prin măsurători distanța dintre două puncte ale unui corp rigid. Pentru aceasta avem nevoie de o linie (un etalon de măsură S) determinată o dată pentru totdeauna, care va fi folosită ca unitate de măsură. Dacă se dau două puncte A şi B ale unui corp rigid, atunci linia dreaptă care le uneşte se poate construi după legile geometriei; apoi, pe această linie de legătură putem suprapune linia S pornind din *A* de atâtea ori până când se ajunge în *B.* Numărul repetărilor acestei suprapuneri va reprezenta măsura dreptei *AB.* Pe acest principiu se *bazează* orice măsurare a lungimii.*

Orice descriere spațială a poziției unui fenomen sau obiect se *bazează* pe faptul că se indică un

* Aceasta presupune că măsurarea dă un număr întreg. De această dificultate ne eliberăm prin utilizarea unor etaloane fracționare a căror introducere nu pretinde o metodă principial noua.

punct al unui corp rigid (sistem de referință) cu
care acel fenomen coincide. Acest lucru este valabil nu doar pentru descrierea ştiinţifică, ci şi pentru viaţa cotidiană. Astfel, dacă vom analiza următoarea indicaţie privind locul „la Berlin, în piaţa Potsdam", vom obţine următoarea semnificaţie: corpul rigid este solul la care se referă indicaţia privind locul; pe el e marcat un punct purtând un nume, „Piaţa Potsdam din Berlin", cu care coincide spaţial fenomenul.*

Acest mod elementar de a indica un loc nu poate servi decât pentru punctele de pe suprafaţa corpurilor rigide, fiind legat de existenţa unor puncte ale acestei suprafeţe ce pot fi distinse reciproc. Să vedem cum se eliberează spiritul uman de aceste două limitări, fără ca esenţa indicării locului să se modifice. De exemplu, să presupunem că deasupra Pieţei Potsdam pluteşte un nor; locul acestuia poate fi stabilit, în raport cu suprafaţa Pământului, ridicând în piaţă o prăjină care să ajungă până la nor. Lungimea prăjinii, măsurată cu etalonul, împreună cu indicarea locului piciorului acestei prăjini va reprezenta o indicaţie completă a poziţiei. Vedem din acest exemplu cum a fost perfecţionată noţiunea de poziţie:

* O cercetare mai adâncă a ceea ce înţelegem noi aici prin coincidenţă spaţială nu e necesară, deoarece această noţiune este suficient de clară, încât, în cazuri reale particulare, nu ar putea să apară diferenţe de opinie dacă această coincidenţă are loc sau nu.

a) se prelungeşte corpul rigid, la care se raportează indicaţia de poziţie a obiectului, în aşa fel încât obiectul ce urmează a fi localizat îl întâlneşte într-un punct determinat;
b) se foloseşte, pentru stabilirea locului, numărul în locul numelor punctelor de reper (aici, lungimea prăjinii măsurate cu etalonul);
c) se vorbeşte de înălţimea norului chiar şi atunci când nu există o prăjină care să-1 poată atinge. In cazul nostru, se va evalua lungimea acestei prăjini care ar trebui confecţionată pentru a atinge norul, prin observaţii optice asupra norului din diferite poziţii de pe sol, ţinând seama de proprietăţile propagării luminii.

Din această examinare rezultă că, în descrierea poziţiei locului, ar fi avantajos dacă am reuşi ca, prin folosirea numerelor indici, să devenim independenţi de existenţa punctelor de reper dotate cu nume pe un corp rigid, ce serveşte ca sistem de referinţă. Acest obiectiv îl realizează fizica în măsurarea prin folosirea sistemului de coordonate cartezian.

Acesta constă din trei planuri rigide perpendiculare două câte două şi legate de un corp rigid. Locul unui eveniment oarecare în raport cu sistemul de coordonate va fi (în mod esenţial) descris prin indicarea lungimii a trei perpendiculare sau coordonate *(x,* y, z) (vezi fig. 2, p. 36) care pot fi duse în acest punct pe cele trei planuri considerate. Lungimile acestor trei perpendiculare pot fi determinate prin manevrarea liniei etalon rigide conform legilor si metodelor geometriei euclidiene.

în aplicații, nu se *realizează* în general cele trei planuri rigide ce constituie sistemul de coordonate; coordonatele nu se măsoară nici ele cu ajutorul etalonului rigid, ci se determină indirect. Sensul fizic al indicației de poziție nu va trebui întotdeauna căutat în direcția explicațiilor de mai sus, dacă vrem ca rezultatele fizicii şi astronomiei să nu devină obscure.*

Din cele de mai sus rezultă deci următoarele: orice descriere spațială a fenomenelor se foloseşte de un corp rigid la care se vor raporta spațial fenomenele; această raportare presupune valabilitatea legilor geometriei euclidiene pentru „liniile drepte", „linia dreaptă" fiind reprezentată fizic prin două puncte marcate pe un corp rigid.

§3. **Spațiul şi timpul în mecanica clasică**

Dacă formulăm obiectivul mecanicii — fără explicații preliminare si considerații complicate — astfel: „mecanica trebuie să descrie schimbările de poziție ale corpurilor în spațiu în funcție de timp", atunci vom comite o serie de păcate de moarte împotriva spiritului sfânt al clarității; aceste păcate vor fi imediat scoase la iveală.

Este neclar ce trebuie să se înțeleagă aici prin „loc" şi „spațiu". Să luăm un exemplu. De la fereastra unui vagon de tren în mişcare uniformă las să

* O perfecționare şi o transformare a acestei concepții va fi necesară doar pentru teoria generală a relativității, care va fi tratată în a doua parte a lucrării.

cadă o piatră pe terasament fără a-i da un impuls. Făcând abstracție de rezistenta aerului, voi vedea piatra căzând în linie dreaptă. Un pieton care, de pe o potecă laterală, vede fapta mea urâtă, observă că piatra cade pe pământ descriind o parabolă. Ne întrebăm: „locurile" pe care piatra le străbate se află „în realitate" pe o dreaptă sau pe o parabolă? Ce înseamnă aici mişcarea „în spațiu"? După remarcile din §2, răspunsul va fi de la sine înțeles. Mai întâi să lăsăm cu totul la o parte expresia vagă „spațiu", prin care, să recunoaştem sincer, nu putem să gândim nimic precis; o vom înlocui prin „mişcare în raport cu un corp de referință practic rigid". Locurile în raport cu un corp de referință (vagonul sau solul) au fost deja definite amănunțit în paragrafele anterioare. Dacă pentru „corp de referință" vom introduce conceptul util pentru descrierea matematică „sistem de coordonate", vom putea spune: piatra descrie în raport cu sistemul de referință legat de vagon o dreaptă, iar în raport cu cel legat de sol o parabolă. Din acest exemplu se vede clar că nu putem vorbi de traiectorie* în sine, ci numai de traiectoria relativă la un sistem de referință.

O descriere *completă* a mişcării nu este dată până nu se indică modul în care corpul îşi modifică locul în funcție de timp. Cu alte cuvinte, pentru fiecare punct al traiectoriei trebuie să se indice momentul temporal în care corpul se află acolo.

* Se numeşte astfel curba de-a lungul căreia se desfăşoară mişcarea corpului considerat.

Aceste indicații trebuie completate cu o asemenea definiție a timpului, încât aceste valori de timp să poată fi considerate, datorită acestei definiții, ca mărimi principial observabile (rezultate ale măsurătorilor). Ne putem conforma acestei-exigențe pentru exemplul nostru, în cadrul mecanicii clasice, în felul următor. Ne imaginăm două ceasornice absolut identice; pe unul dintre ele îl va observa omul de la fereastra trenului, iar pe altul omul de pe drumul lateral. Fiecare dintre cei doi, atunci când ceasornicul său indică o anumită oră, va determina poziția pietrei în raport cu sistemul său de referință. Vom renunța aici la luarea în considerare a inexactității care apare datorită caracterului finit al vitezei de propagare a luminii. Despre aceasta şi despre a doua dificultate — care va trebui biruită aici — vom vorbi mai detaliat mai târziu.

§4. **Sistemul de coordonate galilean**

Principiul mecanicii galileo-newtoniene, cunoscut sub denumirea de legea inerției, spune: un corp suficient de îndepărtat de alte corpuri își menține starea de repaus sau de mişcare uniform-rectilinie. Această propoziție nu spune ceva doar despre mişcarea corpurilor, ci si despre sistemele de coordonate a căror utilizare este admisă în descrierea mecanică. Corpurile care se supun, desigur, cu un grad înalt de aproximare, legii inerției sunt stelele fixe observabile. Dar, în raport cu un sistem de coordonate legat rigid de Pământ, o stea

fixă descrie în cursul unei zile (astronomice) un cerc de rază extrem de mare, în contradicție cu principiul inerției. Pentru a putea menține acest principiu va trebui să raportăm mişcarea numai la sisteme de coordonate față de care stelele fixe nu se mişcă în cerc. Sistemul de coordonate, a cărui stare de mişcare este de aşa natură încât în raport cu el este valabilă legea inerției, îl vom numi „sistem de coordonate galilean". Numai pentru un sistem de coordonate galilean sunt valabile legile mecanicii galileo-newtoniene.

§5. Principiul relativității (în sens restrâns)

Revenim, pentru o intuire mai bună a lucrurilor, la exemplul cu vagonul de tren care se mişcă cu o viteză uniformă. Mişcarea sa o vom numi translație uniformă („uniformă" deoarece viteza şi direcția sa sunt constante; „translație" deoarece vagonul îşi modifică locul în raport cu terasamentul căii ferate, fără a face vreo mişcare de rotație). Să presupunem că un corb zboară în linie dreaptă si în mod uniform în raport cu un observator situat pe sol. Din punctul de vedere al unui observator din trenul aflat în mişcare, zborul lui va reprezenta o mişcare cu o altă viteză şi altă direcție: dar este tot o mişcare rectilinie şi uniformă. Exprimat în mod abstract: dacă o masă *m* se mişcă uniform şi rectiliniu în raport cu un sistem de coordonate *K,* atunci ea se va mişca rectiliniu şi uniform şi în raport cu al doilea sistem de coordonate *K',* atunci

când acesta din urmă are o mişcare de translație uniformă față de *K.* De aici decurge, având în vedere cele spuse şi în paragrafele anterioare, că:
Dacă *K* este un sistem de coordonate galilean, atunci oricare alt sistem de coordonate *K′* va fi unul galilean dacă el se află fată de *K* într-o stare de mişcare de translație uniformă, în raport cu *K′* legile mecanicii galileo-newtoniene sunt la fel de valabile ca şi în raport cu *K.*
Vom face un pas mai departe în generalizare: dacă *K′* reprezintă un sistem de coordonate în mişcare uniformă şi fără rotații în raport cu *K,* atunci fenomenele naturale se vor petrece în raport cu *K′* după aceleaşi legi generale ca şi în raport cu *K.* Acest enunț îl vom numi „Principiul relativității" (în sens restrâns).
Atâta vreme cât domina convingerea că orice fenomen al naturii poate fi reprezentat cu ajutorul mecanicii clasice, nu se putea pune la îndoială validitatea acestui principiu al relativității. Cu noile dezvoltări ale electrodinamicii şi opticii a devenit din ce în ce mai evident că mecanica clasică nu este suficientă ca bază a tuturor descrierilor fizice ale fenomenelor naturale. Atunci s-a pus sub semnul întrebării validitatea principiului relativității, nefiind exclusă posibilitatea ca răspunsul să fie unul negativ.
Oricum, există două fapte generale care pledează din capul locului în favoarea validității principiului relativității. Dacă mecanica clasică nu oferă o bază suficientă pentru explicarea teoretică a

tuturor fenomenelor fizice, trebuie totuşi să-i recunoaştem un conţinut de adevăr foarte important, deoarece ea descrie cu o precizie uimitoare mişcările reale ale corpurilor cereşti. De aceea, si în domeniul mecanicii principiul relativităţii trebuie să fie valabil cu o mare exactitate. Faptul ca un principiu cu un grad atât de înalt de generalitate, care este valid cu o asemenea exactitate într-un domeniu de fenomene, să fi eşuat în alt domeniu de fenomene este *a priori* puţin probabil.

Al doilea argument, asupra căruia vom reveni mai târziu, este următorul. Dacă principiul relativităţii (în sens restrâns) n-ar fi valid, atunci sistemele de coordonate galileene *K, K', K"* etc., care se mişcă unul faţă de altul uniform, n-ar mai fi echivalente pentru descrierea fenomenelor naturale. Ar trebui atunci să admitem că legile naturii se prezintă sub o formă deosebit de simplă şi naturală dacă vom alege ca sistem de referinţă unul dintre toate acestea (K_0) aflat într-o stare determinată de mişcare. Pe acesta îl vom considera, pe bună dreptate (din cauza avantajelor sale pentru descrierea fenomenelor naturale) ca „absolut imobil", celelalte sisteme galileene *K* fiind însă „în mişcare". Dacă, de exemplu, terasamentul căii ferate ar reprezenta sistemul K_0, atunci vagonul nostru de tren ar fi un sistem *K* în raport cu care ar trebui să fie valabile legi mai puţin simple decât cele definite în raport cu K_0. Această simplitate redusă ar trebui pusă pe seama faptului că vagonul *K* se află în mişcare în raport cu K_0 (în mod „real"), în aceste

legi generale ale naturii formulate în raport cu *K,* mărimea şi direcţia vitezei de mişcare a vagonului trebuie să joace un rol. Ne vom aştepta, de exemplu, ca înălţimea tonului unui tub de orgă să fie diferită după cum axa acestui tub va fi paralelă sau perpendiculară pe direcţia de mişcare a trenului. Dar Pământul, aflat în mişcare în raport cu Soarele, este comparabil cu un vagon care se deplasează cu o viteză de 30 km/s. Ar trebui deci să ne aşteptăm, dacă admitem nevaliditatea principiului relativităţii, ca direcţia din fiecare moment a mişcării Pământului să intervină în legile naturii, cu alte cuvinte ca sistemele fizice să depindă în comportamentul lor de orientarea spaţială în raport cu Pământul. Dar, dat fiind că direcţia vitezei mişcării de rotaţie a Pământului se schimbă constant în cursul anului, acesta nu poate fi considerat imobil în raport cu sistemul ipotetic K_0 nici un moment pe parcursul unui an întreg. Dar, cu toate strădaniile, nu s-a putut observa niciodată o asemenea anizotropie fizică a spaţiului, adică o neechivalenţă fizică a diferitelor direcţii. Acesta este un argument foarte puternic în favoarea principiului relativităţii.

§6. **Teorema compunerii vitezelor în mecanica clasică**

Să presupunem iarăşi că acelaşi tren se deplasează cu viteza constantă *v.* într-un vagon, un om se deplasează în sensul lungimii vagonului si anume în aceeaşi direcţie a mişcării trenului, cu viteza

w. Cât de repede, adică cu ce viteză W înaintează omul în raport cu terasamentul? Singurul răspuns posibil pare a decurge din observația următoare: Dacă omul ar rămâne imobil timp de o secundă, în acest timp el s-ar deplasa în raport cu terasamentul cu o lungime *v egală* cu viteza trenului. Dar, în realitate, din cauza mişcării lui proprii, el parcurge în plus în această secundă în raport cu vagonul si, ca urmare, si în raport cu terasamentul, o lungime *w* egală cu viteza deplasării sale. In total, el parcurge deci în această secundă, în raport cu terasamentul, o lungime $W = v + w$.

Vom vedea mai târziu că acest raționament, care în mecanica clasică se numeşte „teorema de compunere a vitezelor", nu este riguros şi, ca urmare, această lege nu este verificată în realitate. Pentru moment vom accepta însă corectitudinea ei.

§7. Incompatibilitatea aparentă a legii propagării luminii cu principiul relativității

Nu există o lege a fizicii mai simplă decât aceea după care se propagă lumina în spațiul vid. Orice elev ştie, sau cred că ştie, că această propagare se produce rectiliniu şi cu o viteză c = 300 000 km/s. In orice caz, noi ştim în mod cert că această viteză este aceeaşi pentru toate culorile. Dacă n-ar fi astfel, atunci minimul strălucirii unei stele fixe în momentul eclipsării sale de către unul din sateliții ei nu s-ar mai observa simultan pentru toate cu-

lorile. Printr-un raționament asemănător privind observarea stelelor duble, astronomul olandez De Sitter a putut să arate şi că viteza de propagare a luminii-nu poate să depindă de viteza de deplasare a sursei luminoase. Pare astfel improbabil ca această viteză de propagare să depindă de direcția ei „în spațiu".

Pe scurt, să admitem că elevul nostru a avut bune temeiuri să creadă în legea simplă a vitezei constante c a luminii (în vid). Cine şi-ar fi închipuit că această lege simplă a creat marilor fizicieni cele mai mari dificultăți posibile? Aceste dificultăți se exprimă astfel:

Trebuie, bineînțeles, să studiem propagarea luminii, ca orice altă mişcare, în raport cu un sistem rigid de referință (sistem de coordonate). Să alegem în această calitate din nou terasamentul nostru, pe care-1 considerăm plasat într-un vid perfect. O rază de lumină trimisă de-a lungul căii ferate se va propaga în raport cu terasamentul cu viteza c. Să ne imaginăm că acelaşi tren se mişcă cu viteza v în acelaşi sens cu cel al propagării luminii, dar, evident, mult mai încet. Care este viteza de propagare a razei luminoase în raport cu vagonul trenului? Raționamentul din paragraful precedent se aplică şi aici în mod evident; căci omul care se deplasează în vagon poate juca rolul razei de lumină; va fi deci suficient să considerăm, în locul vitezei w a deplasării omului în raport cu terasamentul, viteza de propagare a luminii față de acesta; w este astfel viteza căutată a luminii față de vagon, pentru care e valabilă relația:

Viteza propagării razei de lumină în raport cu vagonul se dovedeşte astfel a fi mai mică decât *c*. Acest rezultat se află însă în contradicție cu principiul relativității formulat în §5. Legea propagării luminii în vid trebuie, după principiul relativității, ca orice altă lege generală a naturii, să fie valabilă pentru vagonul de tren luat drept sistem de referință la fel ca si pentru terasamentul căii ferate, considerat ca sistem de referință. Acest lucru se dovedeşte însă, potrivit considerațiilor de mai sus, imposibil. Dacă orice rază de lumină se propagă în raport cu solul cu viteza *c,* atunci tocmai din această cauză pare că viteza de propagare a luminii în raport cu vagonul va trebui să fie diferită — fapt ce contrazice principiul relativității.
Se pare deci că nu putem scăpa din dilema următoare: fie renunțăm la principiul relativității, fie renunțăm la legea simplă de propagare a luminii în vid. Cu siguranță, cititorul care a urmărit cu atenție cele spuse mai sus se va aştepta să fie păstrat principiul relativității, care se impune spiritului prin naturalețe şi simplitate, şi ca legea propagării luminii în vid să fie înlocuită printr-una mai complicată, compatibilă cu principiul relativității. Dezvoltarea fizicii teoretice a arătat însă că acest drum nu poate fi urmat. Cercetările teoretice de o importanță fundamentală ale lui H.A. Lorentz asupra proceselor electrodinamice si optice ce se produc în corpurile aflate în mişcare au arătat că experiențele din acest domeniu conduc în mod obligato-

riu la o teorie a fenomenelor electromagnetice care are drept consecință inevitabilă legea constanței vitezei luminii în vid. De aceea, teoreticienii marcanți au fost înclinați mai degrabă să respingă principiul relativității, deşi nu s-a găsit niciodată un fapt experimental care să fi contrazis acest principiu.

Aici a intervenit teoria relativității. Printr-o analiză a conceptelor de timp si spațiu s-a dovedit că, *în realitate, nu există vreo incompatibilitate între principiul relativității şi legea de propagare a luminii,* că se ajunge la o teorie logic ireproşabilă mai curând prin menținerea simultană a acestor două legi. Această teorie pe care o numim, spre a o deosebi de extinderea ei despre care vom vorbi mai târziu, „teoria specială a relativității'Va fi expusă în continuare în ideile ei fundamentale.

§8. Noțiunea de timp în fizică

Să presupunem că un fulger a căzut asupra liniei ferate în două locuri A si B aflate la o mare distanță unul de altul; dacă vom adăuga la aceasta faptul că cele două fulgere s-au produs simultan si ne vom întreba, stimate cititor, dacă acest enunț are vreun sens, desigur îmi vei răspunde afirmativ. Dacă voi insista să-mi explici mai exact sensul acestui enunț, vei observa, după o oarecare reflecție, că răspunsul la această întrebare nu este atât de simplu cum pare la prima vedere.

După un timp s-ar putea să-ți vină în minte următorul răspuns: „Semnificația enunțului este în sine clară şi nu necesită o explicație suplimentară; mi-ar trebui totuşi un moment de reflecție dacă aş avea sarcina de a constata experimental dacă, în cazuri concrete, cele două evenimente sunt simultane sau nu." Cu acest răspuns nu pot fi de acord din următoarele motive. Să admitem că un meteorolog ar fi descoperit prin raționamente subtile că în locurile A şi B fulgerele cad întotdeauna simultan; se impune totuşi să verificăm dacă acest rezultat teoretic este conform sau nu cu realitatea. Această condiție este aceeaşi pentru toate enunțurile fizice în care conceptul de „simultaneitate" joacă vreun rol. Conceptul există pentru fizician numai atunci când există posibilitatea de a determina în cazurile concrete dacă el corespunde sau nu. Este aşadar nevoie de o asemenea definiție a simultaneității care să ne ofere metoda de a decide experimental în cazurile de mai sus dacă cele două fulgere au fost simultane sau nu. Atâta vreme cât o asemenea condiție nu este îndeplinită, ca fizician (lucrul e valabil si pentru un nefizician!) mă înşel atunci când cred că voi putea da vreun sens simultaneității, (înainte de a citi mai departe, dragă cititorule, trebuie să fii convins de asta.)
îmi vei propune, după un timp de gândire, următoarea modalitate de a constata simultaneitatea a două evenimente: linia ce uneşte cele două locuri *A* şi *B* va fi măsurată de-a lungul căii ferate şi va fi instalat la mijloc (M) un observator dotat cu

un aparat (de exemplu, cu o oglindă înclinată la 90°) care să-i permită să observe simultan cele două puncte A şi B. Dacă observatorul percepe cele două fulgere în acelaşi timp, ele vor fi simultane.
Sunt foarte mulţumit de acest procedeu si totuşi nu consider problema pe deplin lămurită, deoarece mă văd silit să aduc următoarea obiecţie: „Definiţia ta ar fi necondiţionat corectă dacă aş şti deja că lumina, care-i mijloceşte observatorului în M perceperea fulgerului, se propagă cu aceeaşi viteză pe distanţa *A* —»M ca si pe distanţa *B* —> M. O verificare a acestei afirmaţii presupune însă că noi dispunem deja de un mijloc de a măsura timpul. Se pare deci că ne mişcăm într-un cerc vicios."
După ce vei mai reflecta, îmi vei arunca, pe bună dreptate, o privire dispreţuitoare şi vei declara: „Consider că definiţia mea este totuşi corectă, deoarece în realitate ea nu presupune nimic despre lumină. O *singură* condiţie trebuie pusă definiţiei simultaneităţii, şi anume să furnizeze, în fiecare caz real, un procedeu empiric pentru a decide dacă noţiunea definită corespunde sau nu. Este indiscutabil că definiţia mea face acest lucru. Faptul că lumina are nevoie de acelaşi timp pentru a parcurge drumul *A* —> M şi drumul *B* —> M nu reprezintă în realitate o *presupoziţie* sau o *ipoteză* asupra naturii fizice a luminii, ci o convenţie, pe care sunt liber s-o adopt pentru a ajunge la o definiţie a simultaneităţii."
Este clar că această definiţie poate fi folosită pentru a da sens exact enunţului simultaneităţii nu doar

pentru *două* evenimente, ci pentru un număr oarecare de evenimente, indiferent de locul pe care-l ocupă ele în raport cu sistemul de referință (aici terasamentul căii ferate).* Prin aceasta ajungem și la o definiție a „timpului" în fizică. Să ne imaginăm trei ceasornice identice în punctele *A, B si C* ale drumului (sistemul de coordonate), reglate astfel încât pozițiile corespunzătoare ale limbilor lor să fie identice (în sensul de mai sus).
Atunci prin „timpul" unui fenomen se va înțelege indicația de timp (poziția limbii acelui ceasornic care se află în imediata apropiere în spațiu) a fenomenului, în felul acesta, oricărui eveniment i se va pune în corespondență o valoare temporală, care poate fi în principiu observată.
Această convenție conține încă o ipoteză fizică, de a cărei valabilitate nu ne putem îndoi atâta vreme cât nu există temeiuri contrare obținute empiric. Se admite că toate aceste ceasornice merg „la fel de repede", atunci când sunt identic construite, într-o formulare exactă: dacă două ceasornice imobile plasate în două puncte diferite ale sistemului de referință sunt reglate astfel încât acele lor să marcheze *simultan* (în sensul anterior) aceeaşi oră, atunci trecerea lor prin toate pozițiile

* Vom admite în plus că, dacă trei fenomene *A, B, C* se petrec în locuri diferite, dacă *A* este simultan cu B şi B este simultan cu C (simultan în sensul definiției de mai sus), criteriul simultaneității e valabil şi pentru perechea de fenomene *AC*. Această supoziție este o ipoteză fizică asupra legii de propagare a luminii; ea trebuie satisfăcută necondiționat dacă vrem să poată fi păstrată legea constantei vitezei luminii în vid.

corespunzătoare va fi constant simultană (în sensul definiției de mai sus).

§9. Relativitatea simultaneității

Până acum am raportat considerațiile noastre la un sistem de referință determinat, pe care 1-am desemnat prin „terasamentul căii ferate". Să presupunem acum că un tren extrem de lung se deplasează pe linia ferată cu viteza constantă *v* în direcția indicată în fig. 1. Oamenii care vor călători în acest tren vor folosi trenul în mod avantajos ca sistem de referință rigid (sistem de coordonate); ei vor raporta orice eveniment la tren. Orice eveniment ce se produce într-un punct al liniei ferate se va produce de asemenea şi într-un punct determinat al trenului. Chiar si definiția simultaneității poate fi dată în raport cu trenul exact la fel ca şi în raport cu terasamentul. Se pune însă în mod natural următoarea întrebare:

Două evenimente (de exemplu, cele două fulgere *A şi* B), care sunt *simultane în raport cu terasamentul,* sunt simultane şi *în raport cu trenul?* Vom arăta de îndată că răspunsul la aceasta trebuie să fie negativ.

... Tren

0 M' *v* /

	—T **1**	
A	**1** **M** ***E***	**Terasament**

Fio- 1

*. *-ę• •*•

Atunci când spunem că fulgerele A şi B sunt simultane în raport cu terasamentul, aceasta vrea să însemne: razele de lumină ce pornesc din *A* şi *B* se vor întâlni în punctul median M al segmentului *AB*. Evenimentelor A si B le vor corespunde însă locurile *A* si *B* în tren. Fie M' punctul median al lungimii *AB* a trenului aflat în mişcare. Acest punct M' coincide în momentul fulgerului (considerat din punctul de vedere al terasamentului) cu punctul *M, dar* se mişcă spre dreapta (în fig. 1) cu viteza *v a* trenului. Dacă un observator aflat în tren în punctul M' nu ar poseda această viteză, el ar rămâne mereu în M, şi atunci razele de lumină ce pleacă de la fulgerele din A şi B 1-ar atinge în mod simultan, adică s-ar intersecta exact în fața lui. în realitate însă (din punctul de vedere al terasamentului), el se deplasează în întâmpinarea razei ce porneşte din B în timp ce se îndepărtează de raza ce porneşte din A. Aşadar, observatorul va vedea mai devreme raza ce porneşte din B decât cea care porneşte din A. Observatorii care vor folosi trenul drept sistem de referință vor trebui astfel să ajungă la concluzia că fulgerul B s-a produs mai devreme decât fulgerul A. Ajungem astfel la rezultatul foarte important:

Evenimentele care sunt simultane în raport cu terasamentul nu sunt simultane în raport cu trenul şi invers (relativitatea simultaneității). Orice sistem de referință (sistem de coordonate) are propriul său timp; o indicare a timpului nu are sens decât atunci când se face în raport cu un corp (sistem) de referință determinat.

înainte de teoria relativității, fizica a admis întotdeauna în mod tacit faptul că semnificația indicării timpului este absolută, adică independentă de starea de mişcare a sistemului de referință. Am văzut însă deja mai sus că această presupunere nu este compatibilă cu definiția precedentă a simultaneității; dacă respingem această ipoteză, atunci conflictul dintre legea propagării luminii în vid şi principiul relativității (despre care am vorbit în §7) va dispărea.

La acest conflict conduceau tocmai considerațiile din §6 care nu mai pot fi menținute în prezent. Deduceam acolo faptul că un om dintr-un vagon care *într-o secundă* parcurge față de acesta o lungime *w* parcurge aceeaşi lungime şi în raport cu terasamentul *într-o secundă,* întrucât însă, conform considerațiilor de mai sus, timpul necesar desfăşurării unui proces în raport cu vagonul nu trebuie identificat cu durata aceluiaşi proces raportat la terasament drept sistem de referință, nu se mai poate afirma că omul parcurge prin mersul său relativ la vagon lungimea *w* într-un timp care, măsurat în raport cu terasamentul, este egal cu o secundă.

Raționamentul din §6 se bazează de altfel si pe o altă presupunere, care, în lumina unei considerații mai atente, ne apare ca arbitrară, chiar dacă ea a fost admisă întotdeauna (tacit) înainte de formularea teoriei relativității.

§10. Despre relativitatea conceptului de distantă spațială

'

Să considerăm două locuri determinate ale trenului ce se deplasează cu viteza *v* (de exemplu, mijlocul vagoanelor cu numerele l şi 100) şi să ne întrebăm care e distanta dintre ele. Ştim dinainte că pentru măsurare se utilizează lungimea unui corp de referință în raport cu care se va măsura lungimea. Cel mai simplu va fi să folosim trenul însuşi drept corp de referință (sistem de coordonate). Un observator din tren măsoară distanța aşezând cap la cap de-a lungul podelei vagoanelor în linie dreaptă un etalon de un număr de ori până când va ajunge de la un punct marcat la altul; numărul rezultat va fi distanța căutată.

Altfel se petrec lucrurile dacă dorim să măsurăm distanța în raport cu calea ferată. Metoda pe care o vom folosi este următoarea. Notăm cu *A* şi *B'* cele două puncte ale trenului a căror distanță reciprocă vrem s-o măsurăm; ele se mişcă cu viteza *v* de-a lungul terasamentului căii ferate. Ne întrebăm mai întâi asupra punctelor *A* şi *B* de pe calea ferată cu care vor coincide punctele *A'* şi *B'* într-un moment determinat *f,* considerat în raport cu calea ferată. Aceste puncte A şi B ale căii ferate vor fi determinate cu ajutorul definiției timpului date în §8. După aceea se va măsura distanța *AB* aşezând din nou etalonul de lungime de un număr de ori cap la cap de-a lungul căii ferate.

Nu este stabilit *a priori* că această ultimă măsurare va trebui să furnizeze acelaşi rezultat ca pri-

mă. Măsurată în raport cu calea ferată, lungimea trenului poate diferi de cea măsurată în raport cu trenul. Această situație generează o a doua obiecție care poate fi adusă împotriva raționamentelor aparent ireproşabile din §6. în realitate, dacă observatorul din tren parcurge într-un interval de timp — *măsurat în raport cu trenul* — distanța *w,* această distanță nu este necesar să fie egală cu *w* -.— atunci când e măsurată în raport cu calea ferată.

§11. Transformarea Lorentz

Raționamentele din ultimele trei paragrafe ne arată că incompatibilitatea aparentă a legii propagării luminii cu principiul relativității din §7 derivă dintr-o interpretare care împrumută din mecanica clasică două ipoteze prin nimic justificate; aceste ipoteze sună astfel:

1. Intervalul de timp dintre două evenimente este independent de starea de mişcare a corpului (sistemului) de referință;
2. Distanța spațială dintre două puncte ale unui corp rigid este independentă de starea de mişcare a corpului (sistemului) de referință.

Dacă vom părăsi aceste două ipoteze, va dispărea şi dilema din §7, deoarece teorema compunerii vitezelor derivată în §6 îşi va pierde valabilitatea. Va apărea posibilitatea ca legea propagării luminii în vid să devină compatibilă cu principiul relativității. Vom reveni asupra problemei: cum vor trebui modificate considerațiile din §6 pentru a

înlătura contradicția aparentă dintre aceste două rezultate fundamentale ale experienței? Această întrebare conduce la una mai generală, în considerațiile din §6 apăreau poziții şi timpuri în raport cu trenul şi în raport cu terasamentul. Cum se pot găsi poziția şi timpul unui eveniment în raport cu trenul atunci când se cunosc poziția si timpul evenimentului în raport cu calea ferată? Există oare un asemenea răspuns la această întrebare, astfel încât legea de propagare a luminii în vid să nu fie în contradicție cu principiul relativității? In alți termeni: s-ar putea imagina o relație între poziția si timpul unui eveniment în raport cu două sisteme de referință astfel încât orice rază de lumină să posede aceeaşi viteză de propagare c în raport cu calea ferată şi în raport cu trenul? La această întrebare se poate răspunde cu toată certitudinea afirmativ; se poate găsi o lege de transformare, absolut precisă, care să permită evaluarea dimensiunilor spațio-temporale ale unui eveniment atunci când se trece de la un sistem de referință la altul, înainte de a ne referi la asta, vom face următoarele considerații intermediare. Până acum am considerat numai evenimente care se produc de-a lungul căii ferate, căreia i se atribuie, din punct de vedere matematic, proprietățile unei linii drepte. Ne putem însă imagina un sistem de referință ca cel prezentat în §2, prelungit lateral si în înălțime în aşa fel încât ar permite localizarea în raport cu el a unui fenomen ce se petrece, în mod analog, ne putem imagina că trenul ce se deplasează cu o vi-

teză *v* este întins în tot spațiul, astfel încât orice fenomen, oricât de îndepărtat, să poată fi localizat şi în raport cu acest al doilea sistem. Am putea, fără a comite o eroare principială, să nu ținem seama de faptul că aceste două sisteme, datorită impenetrabilității corpurilor solide, vor trebui să se distrugă mereu. In fiecare din aceste sisteme să ne imaginăm trei planuri rectangulare desemnate prin expresia *planuri de coordonate* („sisteme de coordonate"). Căii ferate îi va corespunde atunci sistemul de coordonate *K, iar* trenului sistemul *K'*. Un fenomen oarecare va fi determinat spațial în raport cu *K* prin trei perpendiculare *x, y, z* coborâte pe planurile de coordonate, iar temporal printr-o valoare a timpului *t. Acelaşi* eveniment va fi determinat spațial si temporal în raport cu *K'* respectiv prin valorile *x', y', z', t',* care, fireşte, nu vor corespunde cu *x, y, z, t.* Am expus deja mai sus în detaliu modul în care trebuie considerate aceste mărimi ca rezultate ale unor măsurări fizice. într-o formulare exactă, problema noastră sună în felul următor. Cât de mari sunt valorile *x', y', z', t'* ale unui eveniment în raport cu *K'* atunci când sunt date valorile *x, y, z, t* ale aceluiaşi eveniment în raport cu *K?* Relațiile trebuie astfel alese încât legea de propagare a luminii în vid pentru aceeaşi rază de lumină (oricare ar fi aceasta), în raport cu *K* şi *K',* să fie verificată. Soluția acestei probleme este dată de ecuațiile următoare, cu orientarea spațială relativă a sistemelor de coordonate indicată de fig. 2.

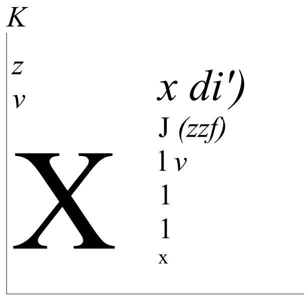


Fig.2

$x-vt$

$t' =$

v^2-

Acest sistem de ecuații este desemnat prin expresia „transformare Lorentz".

Dacă în locul legii propagării luminii vom lua ca bază presupunerea tacită a vechii mecanici asupra caracterului absolut al intervalelor temporale si spațiale, atunci în locul acestor ecuații de transformare vom obine ecuaiile:

$x' -x$

$y' =$

vt

pe care le numim „transformare Galilei". Transformarea Galilei se obține din transformarea Lorentz dacă vom înlocui în ultima egalitate viteza c a luminii cu o viteză de valoare infinită.
Din exemplul următor se vede uşor cum, datorită transformării Lorentz, legea de propagare a luminii în vid este respectată atât pentru sistemul de referință *K,* cât şi pentru sistemul de referință *K'.* Să presupunem că s-a trimis un semnal luminos de-a lungul axei pozitive x şi că el se propagă după ecuația
deci cu viteza c. Conform ecuațiilor transformării Lorentz, această relație simplă între x şi t determină o relație între x' si t'. Dacă vom introduce valoarea ct a lui j în prima şi a patra ecuație a transformării Lorentz, se va obține

'
v—
A, —

$(c-v)\ t$

$t' =$

de unde se deduce imediat prin împărțire

$x' = ct'.$

Această ecuație defineşte propagarea luminii în raport cu sistemul *K'.* Rezultă deci că viteza de propagare a luminii în raport cu sistemul de referință

K' este de asemenea egală cu *c.* Analog se întâmplă cu razele de lumină ce se propagă în oricare altă direcție. Aceasta nu este de mirare, întrucât ecuațiile transformării Lorentz au fost derivate în conformitate cu acest punct de vedere.

§12. Comportamentul riglelor şi ceasornicelor în mişcare

Să aşezăm o riglă de l m pe axa *x'* a sistemului *K'* în aşa fel încât una din extremitățile ei să coincidă cu punctul *x'* = *O,* cealaltă aflându-se în punctul *x'* = *l.* Care este lungimea acestui metru în raport cu sistemul *Kl* Pentru a afla acest lucru ne va fi suficient să determinăm poziția celor două extremități într-un moment determinat *t* în raport cu sistemul *K.* Prima egalitate din transformarea Lorentz ne dă pentru *t* = O următoarele valori pentru cele două puncte:

x (începutul metrului) = O •

x (sfârşitul metrului) = l •

de unde rezultă că distanța dintre puncte este egală cu

Dar, în raport cu *K, rigla* de l m se mişcă cu viteza *v.* De aici rezultă că lungimea riglei rigide, aflată în mişcare cu viteza *v* în sensul lungimii ei, va avea dimensiunea -\/l- -^f- • Rigla rigidă aflată în mişcare este astfel mai scurtă decât aceeaşi riglă aflată în stare de repaus, si anume cu atât mai scurtă cu cât ea se mişcă mai repede.
Pentru viteza $v = c$, -\l *l*- -~ț - O/ iar pentru viteze şi mai mari rădăcina va deveni imaginară. De aici vom deduce că în teoria relativității viteza *c* joacă rolul unei viteze-limită ce nu poate fi atinsă sau depăşită de nici un corp real.
Acest rol al vitezei *c* ca viteză-limită decurge deja din înseşi ecuațiile transformării Lorentz. Acestea ar deveni un nonsens dacă *v* ar fi ales mai mare decât *c.*
Dacă am fi considerat, invers, o riglă de l m pe axa j şi imobilă în raport cu *K,* am fi găsit că lungimea sa în raport cu *K'* are valoarea
aceasta coincide cu sensul principiului relativității pe care 1-am aşezat la baza acestor considerații.
Este *a priori* evident că, din ecuațiile transformării, putem afla ceva despre comportamentul fizic al etaloanelor de măsură si al ceasornicelor. Deoarece mărimile *x, y, z, t* nu sunt altceva decât rezultatele măsurării obținute cu etaloane si ceasornice. Dacă am fi utilizat transformarea Galilei, n-am fi obținut o scurtare a riglei ca urmare a mişcării.

Să considerăm acum un ceasornic cu secundar care se află în x' = O imobil în raport cu *K'*. Cele două timpuri *t'* = *O si* t' = l reprezintă două bătăi succesive ale acestui orologiu. Prima şi cea de-a patra egalitate a transformării Lorentz ne vor da pentru aceste două bătăi

j.__

l

Din punctul de vedere al lui *K,* ceasornicul se mişcă cu viteza *v;* în raport cu acest sistem de referință, între cele două bătăi nu se scurge l secundă, ci

: secunde, cu alte cuvinte un interval mai

-v/l- *vL*

V *c*²

mare de timp. Ceasornicul merge, ca urmare a mişcării lui, mai încet decât în starea de repaus. Şi aici *c* joacă rolul unei viteze-limită inaccesibile.

§13. **Teorema de compunere a vitezelor. Experiența lui Fizeau**

întrucât în practică nu putem deplasa etaloane de lungime şi ceasornice decât cu viteze mici în raport cu viteza *c* a luminii, rezultatele paragrafelor anterioare nu pot fi comparate direct cu realitatea. Dar cum, pe de altă parte, acestea pot să-i pară cititorului absolut ciudate, vom deduce din teorie o altă consecință care poate fi derivată uşor

pornind de la cele spuse până acum şi care va fi confirmată strălucit prin experiment.
în §6 am derivat teorema de compunere a vitezelor orientate în aceeaşi direcţie în conformitate cu ipotezele mecanicii clasice. Aceasta poate fi obţinută uşor şi din transformarea Galilei (§11).
în locul călătorului din vagon, vom introduce un punct care se mişcă în raport cu sistemul de coordonate K' după ecuaţia

$x' = wf.$

Din prima si din a patra ecuaţie a transformării Galilei putem exprima pe x' si t' prin *x si t* obţinând

$x = (v + w)t.$

Această ecuaţie nu exprimă decât legea de mişcare a punctului în raport cu sistemul K (a omului faţă de terasamentul căii ferate); vom desemna viteza acestui punct prin W, obţinând, ca în §6

(A)

$= v + w.$

Putem să facem un raţionament analog bazându-ne pe teoria relativităţii. E suficient să înlocuim în ecuaţia

$xf = wf$

x' şi f prin *x si t* folosind prima şi a patra ecuaţie a transformării Lorentz. Se va obţine atunci în locul ecuaţiei (A) ecuaţia:

(B)

v + w

care corespunde teoremei de compunere a vitezelor orientate în aceeaşi direcţie, conform teoriei relativităţii. Problema este acum care dintre aceste două teoreme e confirmată de experienţă. Aici putem învăţa ceva dintr-un experiment extrem de important pe care genialul fizician Fizeau 1-a făcut cu peste o jumătate de secol în urmă şi care de atunci a fost repetat de unii dintre cei mai buni fizicieni experimentatori, astfel încât rezultatul său este indubitabil. Experimentul se referă la următoarea problemă: într-un fluid imobil lumina se propagă cu o viteză determinată *w.* Cât de repede se propagă ea, în direcţia săgeţii, într-o conductă *R,* dacă prin aceasta trece fluidul respectiv cu viteza *v?*

R

v

Fig.3

Va trebui să presupunem, în sensul principiului relativităţii, că lumina se propagă întotdeauna cu aceeaşi viteză *w în raport cu fluidul,* indiferent dacă fluidul se află în mişcare sau nu în raport cu alte corpuri. Cunoscând deci viteza luminii în ra-

port cu fluidul şi viteza acestuia în raport cu conducta, vom căuta să determinăm viteza luminii în raport cu conducta.

Este clar că aici problema cu care avem de-a face este cea din §6. Conducta joacă rolul terasamentului, respectiv al sistemului de coordonate *K,* fluidul jucând rolul vagonului, adică al sistemului de coordonate *K',* iar lumina pe acela al călătorului care se deplasează în vagon, altfel spus, al punctului în mişcare la care ne-am referit în acest paragraf. Dacă vom desemna prin *W* viteza luminii în raport cu conducta, atunci aceasta ar fi dată fie de ecuaţia (A), fie de ecuaţia (B), după cum realităţii îi corespunde fie transformarea Galilei, fie transformarea Lorentz.

Experienţa[51]' decide în favoarea ecuaţiei (B), derivată din teoria relativităţii, si anume într-o manieră foarte exactă. Influenţa vitezei curentului *v* asupra propagării luminii este reprezentată cu o aproximaţie superioară lui 1%, prin formula (B), după cele mai recente experienţe extrem de valoroase ale lui Zeeman.

i \
c
* Fizeau a găsit *W* = *w* + *v**l*-----, unde *n*=— reprezintă
V n^2 *j*
indicele de refracţie al fluidului. Pe de altă parte, cum
—2 este mic în raport cu l, vom putea înlocui (B) prin
W = *(w* + *v)*(l-—l sau din nou, cu aceeaşi aproximaţie, prin
w + *v*\\ *l*----r- , ceea ce concordă cu rezultatul lui Fizeau.
V *tir)*

Este necesar însă să relevăm faptul că, mult înainte de apariția teoriei relativității, H.A. Lorentz a explicat teoretic acest fenomen pe o cale pur electrodinamica, folosind anumite ipoteze asupra structurii electromagnetice a materiei. Dar aceasta nu diminuează cu nimic forța demonstrativă a experimentului, ca *experimentum cruciş,* în favoarea teoriei relativității. Deoarece electrodinamica Maxwell-Lorentz, pe care se întemeia explicația teoretică originară, nu se află în contradicție cu teoria relativității. Ultima, dimpotrivă, a rezultat din electrodinamica, reprezentând un rezumat surprinzător de simplu şi o generalizare *a* unor ipoteze mai înainte reciproc independente pe care se întemeia electrodinamica.

§14. Valoarea euristică a teoriei relativității

Calea raționamentelor expuse până acum poate fi rezumată astfel. Experiența a condus la convingerea că, pe de o parte, principiul relativității (în sens restrâns) e valid si, pe de altă parte, viteza de propagare a luminii în vid este egală cu o constantă *c.* Prin unificarea acestor două postulate s-a ajuns la legea de transformare pentru coordonate rectangulare *x, y,* z şi timpul *t* ale evenimentelor ce compun procesele naturale şi s-a obținut nu transformarea Galilei, ci (contrar mecanicii clasice) transformarea Lorentz.

In această succesiune de idei, legea propagării luminii a jucat un rol important, recunoaşterea ei

fiind justificată de ceea ce cunoaştem realmente. Putem însă, după ce ne aflăm în posesia transformării Lorentz, s-o unificăm cu principiul relativității şi să rezumăm astfel teoria relativității prin enunțul:

Orice lege generală a naturii trebuie să fie de aşa natură încât ea să se transforme într-o lege de exact aceeaşi formă, atunci când în locul variabilelor spațio-temporale *x, y, z, t,* ale sistemului de coordonate originar *K* sunt introduse noi variabile spațio-temporale *x', y', z', i'* ale unui sistem de coordonate *K',* relația matematică între cele două mulțimi de variabile fiind dată de transformarea Lorentz. Pe scurt: legile generale ale naturii sunt covariante în raport cu transformarea Lorentz.

Aceasta este o condiție matematică precisă pe care teoria relativității o impune unei legi a naturii; ea devine astfel un prețios mijloc euristic care ne ajută în descoperirea legilor generale ale naturii. Dacă s-ar găsi o lege generală care n-ar îndeplini această condiție, atunci cel puțin una dintre presupunerile de bază ale teoriei ar fi contrazisă.

Să examinăm acum la ce rezultate s-a ajuns până în prezent.

§15. Rezultatele generale ale teoriei

Din considerațiile prezentate până acum rezultă clar că teoria relativității (speciale) a apărut din electrodinamică şi optică, în aceste domenii ea nu a modificat cu mult enunțurile teoriei, dar a simplificat

în mod semnificativ construcția teoretică, adică derivarea legilor şi — ceea ce este incomparabil mai important — a diminuat considerabil numărul de ipoteze reciproc independente pe care se *bazează* teoria. Ea a conferit teoriei Maxwell-Lorentz un asemenea grad de evidență încât aceasta era aplicată cu precădere de către fizicieni chiar şi atunci când experimentul nu pleda prea convingător în favoarea sa.

Mecanica clasică a avut nevoie mai întâi de o modificare pentru a fi în acord cu exigențele teoriei relativității. Această modificare se referă în esență doar la legile mişcărilor cu viteze mari, la care vitezele v ale materiei nu sunt prea mici în comparație cu viteza luminii. Experiența semnalează asemenea viteze mari doar la electroni şi ioni; la alte mişcări, abaterile de la legile mecanicii clasice sunt atât de mici încât practic sunt neobservabile. La mişcarea aştrilor ne vom referi doar în cadrul teoriei generale a relativității.

Conform teoriei relativității, energia cinetică a unui punct material de masă m nu va mai fi dată prin expresia cunoscută

m-

ci prin expresia

t =

mc^2-

Această expresie devine infinită atunci când viteza v se apropie de viteza c *a* luminii. De aceea trebuie ca viteza să rămână întotdeauna inferioară lui c, oricât de mari ar fi energiile pe care le-am pune în joc pentru accelerarea corpurilor. Dacă vom dezvolta în serie expresia energiei cinetice, atunci vom obține

$$mc^2 + m\frac{v^2}{2} + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \cdots$$

Atunci când $\frac{v^2}{c^2}$ este mic în raport cu 1, al treilea termen al expresiei e întotdeauna mic în raport cu al doilea, singurul considerat în mecanica clasică. Primul termen, mc^2, nu conține viteza şi de el nu se ține seama atunci când e vorba de a determina modul în care energia unui punct material depinde de viteză. La importanța lui principială ne vom referi mai târziu.

Rezultatul cel mai important de natură generală la care a condus teoria specială a relativității se referă la conceptul de masă. Fizica prerelativistă cunoaşte două legi de conservare cu o semnificație fundamentală, şi anume, principiul conservării energiei si principiul conservării masei; aceste două principii fundamentale apar ca fiind complet independente unul de altul. Teoria relativității le unifică într-un singur principiu. Vom expune doar pe scurt cum se ajunge la acest rezultat şi cum trebuie el înțeles.

Principiul relativității cere ca principiul conservării energiei să nu fie valabil doar în raport cu un sistem de coordonate *K,* ci şi în raport cu orice alt sistem de coordonate *K',* care se află în raport cu *K* într-o translație uniformă (pe scurt, în raport cu orice sistem de coordonate galilean). Trecerea de la un asemenea sistem la altul va fi descrisă, în opoziție cu mecanica clasică, de transformarea Lorentz.

Din aceste premise şi din ecuațiile fundamentale ale electrodinamicii lui Maxwell se poate deduce prin considerații relativ simple următoarea concluzie: un corp mobil cu o viteză *v,* care primeşte energie £$_0$ sub formă de radiație*, fără a-şi modifica astfel viteza, suferă o creştere a energiei egală cu

En

Asadar, dacă vom lua în considerație expresia menționată mai sus a energiei cinetice, energia căutată a corpului va fi dată de formula

m + -

* E_0 reprezintă energia primită, considerată în raport cu un sistem de coordonate care se mişcă odată cu corpul.

Corpul are deci aceeaşi energie ca un corp mo-
£
bil cu viteza *v* şi cu masa *m* + —. Putem astfel spu-
c^2
ne: dacă un corp primeşte o energie E_0, masa sa
£
inerțială va creşte cu —; masa inerțială a unui corp
c^2
nu mai este constantă, ci ea variază proporțional cu modificarea energiei. Masa inerțială a unui sistem de corpuri poate fi deci considerată direct ca măsură pentru energia sa. Principiul conservării masei unui sistem se suprapune cu principiul conservării energiei, fiind valabil numai în măsura în care sistemul nu primeşte sau nu cedează energie. Dacă vom scrie expresia energiei sub forma

$mc^2 + E_n$

atunci putem observa că expresia mc^2, pe care am remarcat-o deja anterior, nu este altceva decât energia pe care o posedă corpul* înainte de a fi primit energia E_0.

Compararea directă a acestui principiu cu experiența este imposibilă pentru moment, deoarece variațiile de energie E_0 pe care le putem imprima

* Considerat în raport cu un sistem de coordonate care se mişcă odată cu el.

unui sistem nu sunt suficient de mari pentru a putea modifica masa inerțială într-o măsură observabilă.

£

Cantitatea — este prea mică în raport cu masa *m* pe care o avea corpul înainte de a fi suferit o modificare de energie. Pe aceasta se bazează faptul că se poate formula cu succes principiul conservării masei cu validitate independentă.

încă o ultimă observație de natură principială. Succesul interpretării Faraday-Maxwell a acțiunii electromagnetice la distanță prin procese intermediare cu viteză de propagare finită a determinat convingerea că nu există acțiuni la distanță nemijlocite, instantanee, de tipul legii gravitației a lui Newton. Teoria relativității a înlocuit acțiunea instantanee la distanță, adică acțiunea la distanță cu o viteză de propagare infinită, printr-o acțiune la distanță cu viteza luminii. Acest fapt se corelează cu rolul principial pe care viteza *c* îl are în această teorie, în cea de-a doua parte se va arăta cum trebuie modificat acest rezultat în teoria generală a relativității.

§16. Teoria specială a relativității si experiența

La întrebarea în ce măsură teoria specială a relativității este întemeiată pe experiență, nu este simplu de răspuns dintr-un motiv care a fost amintit deja în legătură cu experiența fundamentală a lui Fizeau. Teoria specială a relativității s-a crista-

lizat pornind de la teoria Maxwell-Lorentz a fenomenelor electromagnetice. Astfel, toate experiențele care susțin acea teorie electromagnetică susțin si teoria relativității. Semnalez aici ca deosebit de important faptul că teoria relativității explică într-un mod extrem de simplu, în concordanță cu experiența, influențele pe care mişcarea relativă a Pământului în raport cu stelele fixe le exercită asupra luminii care ne vine de la acestea. Acestea sunt deplasarea anuală a poziției aparente a stelelor fixe ca urmare a mişcării Pământului în jurul Soarelui (aberația) şi influența componentei radiale a mişcării relative a stelelor fixe în raport cu Pământul asupra culorii luminii care ajunge până la noi; ultima influență se exprimă într-o uşoară deplasare a liniilor spectrului determinat de lumina care vine de la aceste stele fixe, în raport cu spectrul dat de o sursă de lumină terestră (efectul Doppler). Argumentele experimentale în favoarea teoriei Maxwell-Lorentz, care reprezintă în acelaşi timp şi argumente pentru teoria relativității, sunt prea numeroase pentru a fi expuse aici. Ele restrâng realmente posibilitățile teoretice, astfel încât nici o altă teorie decât teoria Maxwell-Lorentz n-ar putea rezista probei experienței.

Există însă două clase de fapte experimentale descoperite până în prezent pe care teoria Maxwell-Lorentz nu le poate explica decât recurgând la o ipoteză auxiliară care pare, în sine, stranie — dacă nu se recurge la teoria relativității.

Este cunoscut faptul că razele catodice şi aşa-numitele raze *p* emise de substanțele radioactive sunt compuse din corpusculi electrici negativi (electroni) cu o inerție foarte mică si cu viteză foarte mare. Se poate determina foarte exact legea de mişcare a acestor corpusculi, studiind devierea acestor raze sub influența câmpurilor electrice si magnetice.

In studiul teoretic al electronilor s-a întâmpinat o dificultate legată de faptul că electrodinamica nu poate, singură, să dea seama de natura lor. întrucât masele electrice de acelaşi semn se resping, masele negative ce constituie electronii ar trebui să se separe sub influența interacțiunii lor reciproce, dacă între ele n-ar acționa alte forțe a căror natură ne este până în prezent neclară.* Dacă se va admite că distanțele relative ale maselor electrice ce constituie un electron rămân invariabile în ciuda mişcării acestuia (legătura rigidă în sensul mecanicii clasice), atunci se ajunge la o lege de mişcare a electronului care nu corespunde experienței. Ghidat de considerații pur formale, H.A. Lorentz a introdus primul ipoteza după care corpurile electronilor în mişcare suferă o contradicție pe direcția de mişcare proporțională cu -u l - -£-.
" c^2

Această ipoteză, care nu se poate justifica prin nimic în electrodinamica, oferă acea lege de mişca-

* Teoria generală a relativității sugerează că masele electrice care alcătuiesc un electron sunt menținute împreună prin forțele gravitaționale.

re pe care experienţa a verificat-o în anii din urmă cu o precizie foarte mare.

Teoria relativităţii oferă aceeaşi lege de mişcare fără a avea nevoie de vreo ipoteză specială asupra structurii şi a comportamentului electronului. Lucrurile se petrec analog cu cele analizate în §13 în legătură cu experimentul lui Fizeau, al cărui rezultat a fost facilitat de teoria relativităţii fără să fie nevoie de vreo ipoteză asupra naturii fizice a fluidului.

A doua clasă de fapte la care vom face aluzie aici se referă la întrebarea dacă, prin experienţe făcute pe Pământ, poate fi observată mişcarea acestuia în spaţiul cosmic, încă în §5 s-a făcut menţiunea că toate tentativele de acest fel s-au soldat cu rezultate negative, înainte de formularea teoriei relativităţii, ştiinţa întâmpina dificultăţi în explicarea acestor rezultate. Lucrurile se prezentau astfel:

Prejudecăţile tradiţionale asupra spaţiului si timpului nu îngăduiau nici o îndoială asupra validităţii transformării Galilei pentru trecerea de la un sistem de referinţă la altul. Dacă admitem că ecuaţiile Maxwell-Lorentz sunt valabile pentru un sistem de referinţă *K,* atunci vom găsi că ele nu pot fi valabile pentru un alt sistem de referinţă *K',* *aflat* în raport cu primul în mişcare uniformă, presupunând că între coordonatele lui *K* şi *K'* sunt valabile relaţiile din transformarea Galilei. De aici ar rezulta că dintre toate sistemele de coordonate galileene se distinge unul, *K,* aflat într-o stare de mişcare determinată. Aceasta se interpretează fi-

zic considerând pe IC în repaus în raport cu un ipotetic eter luminos. Dimpotrivă, toate sistemele de coordonate *K'* ce se mişcă în raport cu *K* s-ar afla în mişcare în raport cu eterul. Acestei mişcări a lui K' în raport cu eterul („vântul eteric" în raport cu K') i se atribuiau legi complicate care trebuiau să fie valabile în raport cu *K'.* Şi în raport cu Pământul trebuia admis un asemenea vânt eteric, iar fizicienii au încercat multă vreme să-1 pună în evidentă. Pentru aceasta, Michelson a găsit o cale care părea infailibilă. Să ne imaginăm două oglinzi dispuse pe un corp solid cu fețele reflectante orientate una spre alta. O rază de lumină are nevoie de un interval de timp T bine determinat pentru a parcurge înainte şi înapoi drumul ce separă cele două oglinzi, în cazul în care sistemul este imobil în raport cu eterul luminos. Pentru aceasta se găseşte însă prin calcul un interval de timp T' puțin diferit atunci când corpul si oglinzile se aflǎ în mişcare în raport cu eterul. Mai mult, calculul arată că acest interval de timp *T* diferă în cazul în care corpul se deplasează perpendicular pe planul oglinzilor față de cazul în care se deplasează paralel cu acesta, cu o viteză *v* în raport cu eterul. Oricât de neînsemnată ar fi diferența astfel calculată dintre cele două intervale de timp, Michelson şi Morley au realizat un experiment de interferență care ar fi scos clar în evidență această diferență. Dar, spre marea consternare a fizicienilor, experimentul a condus la un rezultat negativ. Lorentz si Fitzgerald au scos teoria din această dificultate ad-

mițând că mişcarea corpurilor în raport cu eterul produce o contracție a acestora pe direcția mişcării, contracție care ar reprezenta *cauza* pentru dispariția acestei diferențe de timp. O comparație cu cele expuse în §12 ne arată că această soluție a fost corectă si din punctul de vedere al teoriei relativității. Dar teoria relativității dă o altă reprezentare a lucrurilor, mult mai satisfăcătoare. După ea, nu există nici un sistem de referință preferențial, care să ofere ocazia introducerii ideii de eter; prin urmare, nu se admite nici vântul eteric şi nici un experiment care 1-ar putea pune în evidență. Contracția corpurilor în mişcare decurge aici, fără vreo ipoteză specială, din cele două principii fundamentale ale teoriei; şi, fără îndoială, nu mişcarea în sine (care pentru noi n-are nici un sens) este cea care determină această contracție, ci mişcarea în raport cu sistemul de referință dinainte ales. De aceea, ansamblul celor două oglinzi din experiența lui Michelson şi Morley nu este scurtat pentru un sistem de referință solidar cu Pământul, ci pentru un sistem de referință imobil în raport cu Soarele.

§17. Spațiul cvadridimensional al lui Minkowski

Ori de câte ori aud de „cvadridimensional" matematicienii sunt scuturați de un frison mistic, stare care seamănă mult cu cea provocată de o fantomă în teatru. Şi totuşi, nici un enunț nu este mai banal

decât cel care afirmă că lumea noastră obişnuită este un continuu spaţio-temporal cvadridimensional.
Spaţiul este un continuu tridimensional. Aceasta înseamnă că este posibil să se descrie poziţia unui punct (imobil) prin trei numere (coordonate)/ x, y, z şi că pentru fiecare punct există puncte oricât de „învecinate" a căror poziţie poate fi determinată prin valori ale coordonatelor (coordonate) x_{lf} y_{j}, z_1 oricât de apropiate de coordonatele x, y, z ale primului punct considerat. Din cauza ultimei proprietăţi vorbim de „continuu", iar din cauza numărului trei al coordonatelor vorbim de „tridimensional".
Analog, lumea fenomenelor fizice, denumită pe scurt de Minkowski „lumea" (universul), este în mod natural cvadridimensională în sens spaţio-temporal. Deoarece ea este compusă dintr-un anumit număr de evenimente izolate, fiecare dintre ele fiind determinat prin patru numere şi anume trei coordonate de poziţie x, y, z şi o coordonată de timp, valoarea timpului t. „Lumea" în acest sens este de asemenea un continuu, căci pentru orice eveniment există oricâte evenimente „vecine" (reale sau imaginare), ale căror coordonate x_v y_{lr} z_v ^ se deosebesc oricât de puţin de cele ale acelui eveniment. Faptul că noi nu suntem obişnuiţi să concepem lumea în acest sens ca un continuu cvadridimensional se *bazează* pe împrejurarea că în fizica prerelativistă timpul juca un rol diferit, independent de cel al coordonatelor spaţiale. De aceea ne-am obişnuit să tratăm timpul drept un continuu

independent. De fapt, în fizica clasică, timpul este o mărime absolută, adică independentă de *situația* şi de *starea de mişcare* a sistemului de referinţă. Aceasta se exprimă prin ultima ecuaţie a transformării Galilei (i' = i).
Prin teoria relativităţii se oferă modul de tratare cvadridimensională a lumii, deoarece conform acestei teorii timpului i se răpeşte independenţa, aşa cum ne arată a patra ecuaţie a transformării Lorentz:

/ v
l ***7T A,***
i.'- C

Conform acestei ecuaţii, diferenţa temporală Ai' a două evenimente în raport cu *K'* în general nu se anulează dacă diferenţa temporală Ai a aceloraşi se anulează în raport cu *K.* Distanţa pur spaţială a două evenimente în raport cu *K* are drept consecinţă o distanţă temporală a acestora în raport cu *K'.* Dar nu în aceasta constă importanta descoperire a lui Minkowski pentru dezvoltarea formală a teoriei relativităţii. Ea constă mai degrabă în ideea după care conţinutul cvadridimensional spaţio-temporal al teoriei relativităţii manifestă în trăsăturile lui formale fundamentale o adâncă înrudire cu conţinutul tridimensional al geometriei euclidiene. Pentru a evidenţia această înrudire, trebuie să se introducă în locul coordonatei obişnuite *t* a timpului mărimea proporţională cu ea si

imaginară *-J^îct* • Atunci însă legile naturii care satisfac exigențele teoriei speciale a relativității iau forme matematice în care coordonatele temporale joacă exact același rol cu cel al celor trei coordonate spațiale. Aceste patru coordonate corespund formal înru totul celor trei coordonate spațiale ale geometriei euclidiene. Prin această idee pur formală, așa cum trebuie să-i apară și nematematicianului, teoria câștigă extraordinar de mult în claritate. Aceste indicații sumare nu-i oferă cititorului decât o idee vagă asupra conceptului important al lui Minkowski, fără de care teoria generală a relativității — care, în liniile ei principale, va fi expusă în continuare — ar fi rămas poate pentru totdeauna în stare incipientă. Totuși, deoarece înțelegerea ideilor fundamentale ale teoriei speciale a relativității și ale teoriei generale a relativității nu reclamă în mod necesar aprofundarea acestui subiect, greu accesibil pentru un cititor nefamiliarizat cu matematica, îl vom părăsi, urmând a reveni asupra lui de-abia în ultimele expuneri ale acestei cărți.

Partea a doua

DESPRE TEORIA GENERALĂ A RELATIVITĂȚII

§18. **Principiul special si cel general al relativității**

Teza fundamentală în jurul căreia se centrează toate considerațiile de până acum a fost *principiul special al relativității,* adică principiul relativității fizice a tuturor mişcărilor *uniforme.* Să-i analizăm încă o dată exact conținutul!

Dintotdeauna a părut evident că nici o mişcare nu ar putea fi considerată, conform cu însuşi conceptul său, decât ca o mişcare *relativă.* Să considerăm astfel din nou exemplul, utilizat de mai multe ori, cu calea ferată şi vagonul. Am putea descrie această mişcare la fel de bine în următoarele două forme:

a) Vagonul se mişcă în raport cu calea ferată.

b) Calea ferată se mişcă în raport cu vagonul.

în cazul a) pentru acest enunț serveşte ca sistem de referință calea ferată, iar în cazul b), vagonul. Pentru simpla determinare, adică descriere a mişcării, este indiferent, în principiu, la care dintre aceste sisteme de referință se raportează mişcarea. Aceasta este, după cum am spus, o evidență

care nu trebuie confundată cu un enunț mai cuprinzător, pe care noi 1-am numit „principiul relativității" şi pe care 1-am pus la baza cercetărilor noastre.

Principiul folosit de noi nu afirmă numai faptul că putem să alegem ca sistem de referință pentru descrierea mişcării oricărui fenomen la fel de bine atât vagonul, cât şi calea ferată (căci şi acest fapt e evident). Principiul nostru afirmă, în plus: dacă se formulează legile generale ale naturii, aşa cum rezultă ele din experiență:

a) fie că se alege calea ferată ca sistem de referință,

b) fie că se alege vagonul ca sistem de referință,

aceste legi sunt perfect identice în ambele cazuri (de exemplu, legile mecanicii sau legea vitezei propagării luminii în vid). Ne putem exprima şi în felul următor: pentru descrierea *fizică* a proceselor naturale nu poate fi distins nici unul dintre sistemele de referință K si K'. Acest ultim enunț nu este necesarmente *a priori* adevărat, aşa cum este primul; el nu este conținut în noțiunile de „mişcare" şi „sistem de referință" si nu e derivabil imediat din ele, ci asupra validității lui va decide numai *experiența.*

Până în prezent noi n-am afirmat echivalența tuturor sistemelor de referință K în raport cu formularea legilor naturii. Mai degrabă am folosit o altă cale. Noi am plecat în primul rând de la ipoteza că există un sistem de referință K cu o asemenea stare de mişcare încât față de el e valabil

principiul lui Galilei: un punct material izolat, îndepărtat de toate celelalte corpuri, se mişcă uniform şi rectiliniu. In raport cu *K* (sistem de referinţă galilean) legile naturii trebuie să fie cât mai simple cu putinţă, în afara lui *K* însă, celelalte sisteme de referinţă *K'* vor trebui privilegiate în acest sens şi, pentru formularea legilor naturii, considerate echivalente cu *K* acelea care descriu în raport cu X o mişcare rectilinie şi uniformă, lipsită de rotaţie; toate aceste sisteme de referinţă vor fi considerate sisteme de referinţă galileene. Numai pentru aceste sisteme de referinţă a fost admisă validitatea principiului relativităţii, nu si pentru altele care efectuează altfel de mişcări. In acest sens vorbim de principiul *special* al relativităţii, respectiv de teoria specială a relativităţii.

în opoziţie cu acestea, prin „principiul general al relativităţii" vom înţelege afirmaţia: toate sistemele de referinţă *K, K'* etc. sunt echivalente pentru descrierea naturii (formularea legilor generale ale naturii), oricare ar fi starea lor de mişcare. Vom observa de îndată că această formulare va fi înlocuită printr-una mai abstractă din motive ce vor apărea doar mai târziu.

După ce s-a confirmat introducerea principiului special al relativităţii, oricărui spirit avid de generalizare trebuie să-i apară atrăgătoare ideea de a îndrăzni să facă pasul spre principiul general al relativităţii. Dar o apreciere simplă, foarte întemeiată în aparenţă, face ca, pentru moment, o asemenea tentativă să pară fără şanse. Cititorul

să se imagineze în vagonul, atât de des invocat, care se mişcă uniform. Atâta vreme cât vagonul se mişcă uniform, călătorii nu vor percepe nimic cu privire la mişcarea vagonului. Călătorii şi-ar putea chiar închipui că vagonul este imobil şi că în mişcare se află terasamentul. Potrivit principiului special al relativităţii, această interpretare este de altfel absolut justificată si din punctul de vedere al fizicii.

Să presupunem că, în urma unei frânări bruşte, mişcarea vagonului nu mai este uniformă; călătorul va simţi că e împins violent înainte. Mişcarea accelerată a vagonului se manifestă prin comportamentul mecanic al corpurilor în raport cu el; comportamentul mecanic nu este acelaşi ca în cazul examinat anterior, şi pare de aceea exclus ca aceleaşi legi mecanice să fie valabile în raport cu vagoanele în mişcare neuniformă ca şi în raport cu vagoanele în repaus sau în mişcare uniformă, în orice caz, este clar că principiul fundamental al lui Galilei nu mai este valabil pentru vagoanele în mişcare neuniformă. Suntem de aceea obligaţi să-i acordăm mişcării neuniforme, în ciuda principiului general al relativităţii, un gen de realitate fizică absolută. Vom vedea însă mai târziu că această concluzie nu e corectă.

§19. Câmpul gravitaţional

La întrebarea „De ce o piatră pe care o ridicăm şi apoi o lăsăm liberă cade la pământ?" se răspun-

de de obicei: „Deoarece ea este atrasă de pământ." Fizica modernă formulează răspunsul oarecum diferit, din următorul motiv. Studierea exactă a fenomenelor electromagnetice a condus la concluzia că nu există o acțiune nemijlocită la distantă. De exemplu, atunci când un magnet atrage o bucată de fier, nu trebuie să ne declarăm mulțumiți cu ideea că magnetul acționează direct asupra fierului prin spațiul vid care le separă, ci trebuie să ne imaginăm mai degrabă, după Faraday, că magnetul creează permanent în spațiul care-1 înconjoară ceva fizic real numit „câmp magnetic". La rândul său, acest câmp magnetic acționează asupra bucății de fier în aşa fel încât aceasta tinde să se deplaseze spre magnet. Nu vom discuta aici justificarea acestei noțiuni intermediare arbitrare. Vom observa doar că, datorită ei, fenomenele electromagnetice, în special propagarea undelor electromagnetice, pot fi reprezentate teoretic mult mai satisfăcător decât fără ea. în mod analog se concep şi efectele gravitației.
Pământul acționează indirect asupra pietrei. El generează în vecinătatea sa un câmp gravitațional. Acesta acționează asupra pietrei şi provoacă mişcarea ei de cădere. Forța acestei acțiuni asupra unui corp descreşte conform experienței pe măsură ce ne îndepărtăm de Pământ, după o lege perfect determinată. Potrivit modului nostru de a concepe lucrurile, aceasta vrea să spună: legea care guvernează proprietățile spațiale ale câmpului gravitațional trebuie să fie una precis determinată pentru a

reprezenta corect scăderea acțiunii gravitației cu distanța dintre corpurile care interacționează. Ne reprezentăm oarecum corpurile (de exemplu, Pământul) generând direct câmpul în vecinătatea lor imediată; la o distanță mai mare, intensitatea şi direcția câmpului vor fi determinate de legea care guvernează proprietățile spațiale ale câmpului gravitațional.

Spre deosebire de câmpurile electrice si magnetice, câmpul gravitațional prezintă o proprietate absolut remarcabilă, care va fi de o importanță fundamentală pentru cele ce urmează. Corpurile care se mişcă exclusiv sub acțiunea câmpului gravitațional suferă o accelerație ce nu depinde nici de substanța, nici de starea lor fizică. O bucată de plumb si una de lemn, în vid, de exemplu, vor cădea la fel de repede în câmpul gravitațional dacă le vom lăsa să cadă fără, respectiv cu aceeaşi viteză inițială. Am putea formula şi altfel această lege extrem de precisă, pe baza următoarelor considerente.

După legea de mişcare a lui Newton,

(Forța) = (Masa inerțială) x (Accelerația),

unde „masa inerțială" este o constantă caracteristică a corpurilor accelerate. Dacă se consideră gravitația ca forță de accelerație, atunci vom avea, pe de altă parte,

(Forța) = (Masa grea) x (Intensitatea câmpului gravitațional),

unde „masa gravitațională" este, de asemenea, o constanta caracteristică pentru corpuri. Din cele două relații decurge:

(Masa grea)   /   imensitatea
(Accelerația) = -------------------x l   ...
(Masa inerțială)   \«>mPulul gravitațional

Experiența demonstrează că, pentru un câmp gravitațional dat, accelerația este mereu aceeaşi, fiind independentă de natura şi de starea corpurilor; de aici rezultă că raportul dintre masa grea şi masa inerțială este mereu acelaşi pentru toate corpurile. Am putea deci, alegând convenabil unitățile, să facem acest raport egal cu 1. Atunci e valabilă propoziția: masa *grea şi* masa *inerțială* ale unui corp sunt identice.

Mecanica de până acum a *înregistrat* această propoziție importantă, dar n-a interpretat-o. O interpretare satisfăcătoare poate apărea doar dacă se admite că aceeaşi calitate a corpului se manifestă, după caz, ca „inerție" sau ca „greutate". Vom expune în capitolul următor în ce măsură acest lucru se petrece realmente si cum se corelează această problemă cu postulatul general al relativității.

§20. Identitatea maselor grea si inerțială ca argument pentru postulatul general al relativității

Să ne imaginăm o mare porțiune a spațiului cosmic vid, atât de îndepărtată de aştri şi de orice masă

importantă, încât ne încadrăm cu mare precizie în cazul prevăzut pentru legea fundamentală a lui Galilei. Atunci, pentru această porțiune a lumii devine posibil să alegem un sistem de referință galilean în raport cu care punctele imobile rămân imobile, iar punctele în mişcare conservă constant o mişcare rectilinie si uniformă. Să ne imaginăm ca sistem de referință o imensă cutie de forma unei camere; să presupunem că în interiorul ei se află un observator care dispune de aparate de măsură. Pentru el, fireşte, nu există greutate. El va trebui să se fixeze pe podea cu sfori pentru ca nu cumva, la cea mai mică ciocnire cu planşeul, să se înalte lent spre plafonul camerei.

Să presupunem că în mijlocul capacului cutiei se găseşte, în afară, un cârlig fixat prin corzi si că cineva trage de el cu o forță constantă. Cutia şi observatorul încep să zboare în mişcare uniform accelerată în „sus". Viteza lor va creşte fantastic în timp, dacă vom considera acest ansamblu în raport cu un alt corp de referință de care nu se trage cu ajutorul unei corzi.

Cum judecă omul din cutie acest proces? Accelerația cutiei va fi transmisă acesteia sub forma contrapresiunii prin intermediul planşeului. El va trebui deci să preia această presiune prin picioarele sale, dacă nu va dori să se întindă pe jos cât este de lung. El stă deci în cutia sa exact la fel cum stă omul în camera unei case. Dacă va lăsa să-i cadă un corp pe care mai înainte îl ținuse în mână, atunci accelerația cutiei nu se va transmite aces-

tui corp, iar corpul se va apropia de planseul cutiei cu o mişcare relativă accelerată. Observatorul se va convinge apoi că *accelerația corpurilor în raport cu planseul este întotdeauna aceeaşi, oricare ar fi corpul cu care el face experiența.*

Bazându-se pe cunoştințele sale asupra câmpului gravitațional despre care am vorbit în capitolul precedent, observatorul va ajunge la concluzia că se află, împreună cu cutia, într-un câmp gravitațional constant în timp. O clipă va fi mirat de faptul că această cutie nu cade în câmpul gravitațional. După aceea va descoperi cârligul în mijlocul plafonului şi coarda întinsă fixată de el şi va conchide: cutia e suspendată astfel încât rămâne imobilă în câmpul gravitațional.

Avem dreptul să zâmbim şi să spunem că această concluzie a observatorului e falsă? Cred că nu, dacă vrem să rămânem consecvenți cu noi înşine; mai mult, va trebui să admitem că modul lui de a concepe lucrurile nu se opune nici rațiunii şi nici legilor mecanice cunoscute. Putem considera cutia imobilă, chiar dacă ea se află în mişcare accelerată în raport cu „spațiul galilean" analizat anterior.

Avem astfel un bun temei să extindem principiul relativității la sistemele de referință aflate în mişcare accelerată unele în raport cu altele, obținând astfel un argument serios pentru un postulat al relativității generalizate.

Trebuie remarcat că posibilitatea acestui mod de a concepe lucrurile se bazează pe proprietatea fundamentală a câmpului gravitațional de a

transmite tuturor corpurilor aceeaşi accelerație sau, în mod echivalent, pe legea identității dintre masa inerțială şi masa grea. Dacă această lege a naturii n-ar exista, observatorul din cutia în mişcare accelerată n-ar interpreta comportamentul corpurilor din preajma sa prin ipoteza unui câmp gravitațional, iar experiența nu i-ar permite să considere sistemul său de referință ca fiind „imobil".
Să presupunem că observatorul din cutie fixează pe partea inferioară a plafonului cutiei o coardă, suspendând un corp la extremitatea ei liberă. Coarda va rămâne întinsă si atârnând „vertical" sub influența acestui corp. Să cercetăm cauza tensiunii corzii. Observatorul din cutia sa va spune: „Corpul suspendat este supus în câmpul gravitațional unei forțe dirijate în jos care este echilibrată de tensiunea corzii. *Masa grea* a corpului suspendat este aceea care determină mărimea tensiunii corzii." Pe de altă parte, un observator care pluteşte liber în spațiu va judeca lucrurile astfel: „Coarda este antrenată în mişcarea accelerată a cutiei şi o transmite corpului fixat de ea. Tensiunea corzii este atât de mare, încât ea poate să producă accelerația corpului. *Masa inerțială* a corpului este aceea care determină tensiunea corzii." Vom vedea din acest exemplu că, generalizând principiul relativității, am pus în evidență *necesitatea* identității dintre masa inerțială şi masa grea. Astfel am ajuns la o interpretare fizică a acestei propoziții.
Din considerațiile asupra cutiei în mişcare accelerată se poate observa că teoria generală a re-

lativitătii trebuie să ofere rezultate importante cu privire la legile gravitației. De fapt, dezvoltarea consecventă a ideii relativității generale a condus la legile care guvernează câmpul gravitațional. Trebuie totuşi să avertizez cititorul asupra unei neînțelegeri ce ar putea rezulta din cele spuse mai sus. Pentru omul din cutie există un câmp gravitațional, în ciuda faptului că pentru primul sistem de coordonate ales nu a existat unul. S-ar putea deduce uşor că existența unui câmp gravitațional este întotdeauna doar *aparentă.* S-ar putea crede că, oricare ar fi câmpul gravitațional considerat, ar putea fi ales întotdeauna un alt sistem de referință, astfel încât în raport cu el să nu existe nici un câmp gravitațional. Acesta nu este însă cazul pentru toate câmpurile gravitaționale, ci numai pentru unele de o structură cu totul specială. E imposibil, de exemplu, să alegem un sistem de referință astfel încât, privind lucrurile în raport cu el, câmpul gravitațional al Pământului să dispară.

Observăm acum de ce argumentul expus la sfârşitul §18 împotriva principiului general al relativității nu este demonstrativ. Este adevărat că observatorul din vagon se va simți împins înainte în timpul unei frânări bruşte, sesizând astfel viteza neuniformă (accelerată) a vagonului. Dar nimeni nu-1 obligă să atribuie acest impuls unei accelerații „reale" a vagonului. El ar putea să interpreteze fenomenul şi astfel: „Sistemul meu de referință (vagonul) rămâne permanent imobil. Dar în raport cu el acționează (în timpul frânării) un

câmp gravitațional orientat înainte şi variabil în timp. Sub influenta acestuia terasamentul se mişcă odată cu Pământul, astfel încât viteza inițială a acestuia, orientată înapoi, descreşte constant. Aşadar, câmpului gravitațional i se datorează impulsul primit de observator."

§21. **în ce măsură fundamentele mecanicii clasice si ale teoriei speciale a relativității sunt nesatisfăcătoare?**

După cum am amintit de mai multe ori, mecanica clasică porneşte de la principiul: punctele materiale aflate suficient de departe unele de altele se mişcă rectiliniu şi uniform sau îşi conservă starea de repaus. Am subliniat în repetate rânduri că această lege fundamentală nu poate fi valabilă decât pentru sisteme de referință *K* aflate într-o anumită stare de mişcare specială, deplasându-se unele față de altele într-o mişcare uniformă de translație. Acest principiu nu este valabil în raport cu alte sisteme de referință *K'*. Atât în mecanica clasică, cât şi în teoria specială a relativității, se distinge în mod corespunzător între sisteme de referință *K*, în raport cu care legile naturii sunt valabile şi sisteme de referință *K'*, în raport cu care legile naturii nu sunt valabile.

Dar nici un spirit logic nu se poate declara mulțumit de această stare de lucruri. El îşi pune întrebarea: „Cum e posibil ca anumite sisteme de referință (respectiv starea lor de mişcare) să se distingă de alte sisteme de referință (sau de starea lor de mis-'

care)? *Care este temeiul acestei distincții?"* Mă voi servi de o comparație pentru a arăta mai clar ce vreau să spun cu această întrebare.

Considerăm un aragaz pe care se află două vase atât de asemănătoare încât pot fi confundate. Ambele sunt pe jumătate umplute cu apă. Remarcăm faptul că dintr-unul din aceste vase se ridică mereu aburi, nu însă şi din celălalt. Ne vom mira, chiar dacă nu am fi văzut niciodată până atunci un aragaz şi un vas pentru fiert apă. Mirarea noastră va dispărea atunci când sub primul vas vom observa licărind ceva albăstriii, iar sub al doilea nu (chiar dacă până atunci n-am văzut o flacără de aragaz). Vom putea spune doar că acest ceva albăstrui reprezintă cauza degajării vaporilor sau, în orice caz, *ar putea fi* cauza lor. Dacă nu am fi observat acest ceva albăstrui sub nici unul dintre vase si dacă totuşi am fi observat că unul dintre ele degajă continuu vapori, nu însă şi celălalt, am fi rămas mirați şi nemulțumiți până când am fi sesizat o situație pe care s-o facem răspunzătoare de comportamentul diferit al celor două vase.

In mod analog, în mecanica clasică (respectiv, în teoria specială a relativității) noi căutăm în zadar ceva real prin. care să întemeiem comportamentul diferit al corpurilor în raport cu sistemele de referință K şi K'.* Newton cunoştea deja această

* Această obiecție este în mod special importantă dacă starea de mişcare a sistemului de referință este de aşa natură încât pentru menținerea ei nu este necesară nici o influență exterioară, de exemplu în cazul în care sistemul de referință se roteşte uniform.

obiecție şi a încercat fără succes s-o combată. E. Mach este acela care a recunoscut-o cel mai clar şi a cerut din această cauză ca mecanica clasică să fie întemeiată pe alte baze. Această obiecție nu poate fi depăşită decât printr-o fizică în conformitate cu principiul general al relativității. Deoarece ecuațiile acestei teorii sunt valabile pentru orice sistem de referință, indiferent de starea de mişcare în care s-ar afla.

§22. **Unele consecințe ale principiului general al relativității**

Considerațiile din §20 arată că principiul general al relativității ne pune în situația de a deriva pe o cale pur teoretică proprietățile câmpului gravitațional. Să presupunem că se cunoaşte desfăşurarea spațio-temporală a unui proces natural oarecare, aşa cum se petrece el în domeniul galilean în raport cu un sistem de referință galilean *K*. Atunci am putea afla prin operații pur teoretice, adică prin simplu calcul, cum se comportă acest fenomen natural cunoscut în raport cu un sistem de referință *K'* în mişcare accelerată față de *K*. întrucât însă în raport cu acest nou sistem de referință *K'* există un câmp gravitațional, se poate deduce rațional modul în care acest câmp gravitațional influențează fenomenul studiat. Astfel noi aflăm, de exemplu, că un corp în mişcare rectilinie uniformă în raport cu *K* (corespunzător principiului lui Galilei) are o mişcare accelerată şi în

general curbilinie, în raport cu sistemul de referință accelerat *K'* (cutie). Această accelerație, respectiv curbură, corespunde influenței asupra corpului în mişcare a câmpului gravitațional care se manifestă în raport cu *K'*. Faptul că acest câmp gravitațional influențează îh acest mod mişcarea corpurilor e cunoscut, prin urmare observația de față nu ne-a adus nimic nou în principiu.

Vom obține însă un rezultat nou de o importanță fundamentală dacă vom aplica această observație la o rază de lumină. Ea se propagă, în raport cu un sistem de referință galilean *K,* în linie dreaptă cu viteza *c.* Dar, în raport cu o cutie aflată în mişcare accelerată (sistemul de referință *K'),* traiectoria acestei raze de lumină, după cum se poate demonstra uşor, nu mai este o linie dreaptă. De aici trebuie să conchidem că, *în general, în câmpurile gravitaționale, razele de lumină nu se propagă în linie dreaptă.* Acest rezultat este foarte important din două motive.

In primul rând, el se poate confrunta direct cu realitatea. Dacă un raționament ne arată că această curbură a razelor de lumină, calculată după teoria generală a relativității, nu este decât foarte mică pentru câmpurile gravitaționale de care dispunem în experiența noastră, ea trebuie să atingă 1,7 secunde de arc pentru razele de lumină care se propagă în apropierea Soarelui. De aici trebuie să rezulte că stelele fixe, vizate din apropierea Soarelui, observație posibilă în timpul eclipselor totale, ne vor apărea îndepărtate de Soare în raport cu poziția pe care ele o ocupă pe cer atunci când

Soarele se află într-un alt punct al cerului. Verificarea acestei consecințe este o sarcină de cea mai mare importanță, a cărei rezolvare viitoare o sperăm din partea astronomilor.*

în al doilea rând, această consecință ne arată că, în conformitate cu teoria generală a relativității, legea adesea enunțată a constanței vitezei luminii în vid, ce constituie una dintre cele două ipoteze fundamentale ale teoriei speciale a relativității, nu poate pretinde o valabilitate nelimitată. O curbură a razelor de lumină se poate produce numai dacă viteza de propagare a luminii diferă de la un loc la altul. Am putea considera că această consecință răstoarnă teoria specială a relativității si, implicit, teoria relativității în genere, în realitate, lucrurile nu stau astfel. Putem conchide doar că teoria specială a relativității nu poate pretinde un domeniu de valabilitate nelimitat; rezultatele ei nu sunt valabile decât atunci când se pot neglija influențele câmpurilor gravitaționale asupra fenomenelor (de exemplu, asupra luminii).

Deoarece adversarii teoriei relativității au afirmat adesea că teoria specială a relativității a fost răsturnată de teoria generală a relativității, as dori să lămuresc, printr-o comparație, cum stau în realitate lucrurile, înainte de apariția electrodinamicii, legile electrostaticii erau considerate ca legile elec-

* Existența devierii luminii prezisă de teorie a fost constatată fotografic cu ocazia eclipsei de soare din 30 mai 1919 de către două expediții organizate de Royal Society sub conducerea astronomilor Eddington şi Crommelin.

tricității pur si simplu. Astăzi noi ştim că electrostatica nu se poate aplica în mod corect câmpurilor electrice decât în cazul (care nu este niciodată realizat în mod absolut) când masele electrice sunt riguros imobile unele în raport cu altele şi în raport cu sistemul de coordonate. Ecuațiile de câmp ale lui Maxwell în domeniul electrodinamicii au răsturnat oare electrostatica? Deloc. Electrostatica este considerată drept un caz limită al electrodinamicii; legile acesteia din urmă duc în mod direcția cele ale electrostaticii în cazul în care câmpurile sunt constante în raport cu timpul. Este cel mai frumos tip de teorie fizică ce deschide calea unei teorii mai generale, în cadrul căreia ea se menține ca un caz limită.

Am văzut, în exemplul în care se analiza problema propagării luminii, că principiul general al relativității ne dă posibilitatea să derivăm pe o cale teoretică influența câmpului gravitațional asupra desfăşurării fenomenelor, atunci când se cunosc deja legile lor în cazul când nu există câmp gravitațional. Problema cea mai interesantă pe care o rezolvă principiul relativității se referă însă la găsirea legilor de care ascultă însuşi câmpul gravitațional. Situația este următoarea.

Cunoaştem domenii spatio-temporale care, prin alegerea corespunzătoare a sistemului de referință, se comportă (aproximativ) „galilean", adică domenii în care câmpurile gravitaționale lipsesc. Dacă raportăm un asemenea domeniu la un sistem de referință oarecare K' aflat în mişcare, atunci în

raport cu *K′* există un câmp gravitațional variabil în timp si spațiu.* Caracteristicile acestuia depind în mod natural de felul în care noi alegem mişcarea lui *K′*. Conform teoriei generale a relativității, legea generală a câmpului gravitațional trebuie să fie satisfăcută de toate câmpurile gravitaționale astfel obținute. Chiar dacă nu putem produce pe această cale toate câmpurile gravitaționale, sperăm totuşi să putem deduce din aceste câmpuri gravitaționale de un tip special legea generală a gravitației. Această speranță a fost desăvârşit împlinită. Dar, de la conceperea clară a acestui obiectiv până la realizarea lui efectivă, a trebuit să fie surmontată încă o dificultate serioasă, pe care n-o pot ascunde cititorului, deoarece ea este adânc înrădăcinată în natura acestei situații. Mai întâi să aprofundam însă proprietățile continuului spațiu-timp.

§23. **Comportamentul ceasornicelor şi etaloanelor de lungime într-un sistem de referință în mişcare de rotație**

Până acum, în mod intenționat n-am vorbit despre interpretarea fizică a indicațiilor de timp si spațiu în cazul teoriei generale a relativității. M-am făcut prin aceasta vinovat de o anumită incorectitudine care nu este nici scuzabilă, nici lipsită de importanță, după cum ştim din teoria specială a relativității. Este timpul să umplem acest gol; vom

* Aceasta rezultă dintr-o generalizare a raționamentului făcut în §20.

observa însă de la început că înțelegerea acestei probleme necesită din partea cititorului multă răbdare şi putere de abstracție.

Să considerăm din nou cazuri cu torul speciale la care am apelat de atâtea ori. Fie un domeniu spațio-temporal în care nu există câmp gravitațional în raport cu un sistem de referință *K* aflat într-o stare de mişcare convenabil aleasă; în raport cu acest domeniu, *K* este atunci un sistem de referință galilean şi rezultatele teoriei speciale a relativității sunt valabile în raport cu *K.* Să ne imaginăm acelaşi domeniu în raport cu un al doilea sistem de referință *K',* care se roteşte uniform față de *K.* Pentru fixarea ideilor, să ne imaginăm că *K'* este reprezentat de un disc plat care se roteşte uniform în jurul centrului în planul său. Un observator situat excentric pe acest disc *K'* este supus unei forțe ce acționează pe direcția radială spre exterior, forță atribuită efectului inerției (forță centrifugă) de către un observator imobil în raport cu primul sistem. Observatorul aşezat pe disc ar putea considera discul său un sistem de referință „imobil" având drept justificare principiul general al relativității. El va concepe forța ce acționează asupra sa şi, în general, asupra tuturor corpurilor imobile în raport cu discul ca datorată unui câmp gravitațional. Fără îndoială, distribuția în spațiu a acestui câmp gravitațional este una care ar fi imposibilă din punctul de vedere al teoriei newtoniene a gravitației.*

* Câmpul se anulează în centrul discului şi creşte proporțional cu distanța pornind din acest punct spre exterior.

întrucât însă observatorul crede în teoria generală a relativității, acest fapt nu-l deranjează; el speră, pe bună dreptate, că s-ar putea formula o lege generală a gravitației care să explice corect nu numai mişcarea aştrilor, ci si câmpul de forțe pe care-l percepe el pe disc.

Acest observator face experiențe pe discul său cu ceasornice şi etaloane de lungime, cu intenția de a ajunge pe baza observațiilor la definiții exacte pentru indicațiile de timp şi spațiu în raport cu discul *K'*. Ce-i vor arăta aceste experiențe?

Să presupunem două ceasornice identice fixate de observator, unul în centrul discului si altul la periferia acestuia, astfel încât ambele să rămână imobile în raport cu discul. Ne întrebăm dacă aceste două ceasornice merg la fel de repede din punctul de vedere al sistemului de referință galilean *K* care nu se află în mişcare de rotație. Din această perspectivă considerând lucrurile, ceasornicul din centrul discului n-are nici o viteză, în timp ce cel de la periferie, ca urmare a rotației în raport cu *K,* se află în mişcare. După un rezultat din §12, ceasornicul al doilea merge, în raport cu *K,* mai încet decât cel din centrul discului. Acelaşi lucru trebuie să-l constate evident şi observatorul de pe disc, pe care-l presupunem situat în centrul discului lângă ceasul de acolo. Astfel, un ceasornic merge mai repede sau mai încet pe discul nostru sau în general într-un câmp gravitațional, în funcție de locul în care este plasat (în repaus) ceasornicul. De aceea nu este posibil ca timpul să fie definit rațional cu

ajutorul ceasornicelor imobile în raport cu un sistem de referinţă. O dificultate asemănătoare apare şi atunci când se încearcă să se aplice aici vechea noastră definiţie a simultaneităţii, problemă asupra căreia nu voi insista.

Dar şi definiţia coordonatelor spaţiale ridică la început dificultăţi în aparenţă insurmontabile. Dacă observatorul aflat în mişcare odată cu discul va pune rigla sa gradată (o riglă foarte mică în raport cu raza discului) tangent la periferia discului, lungimea sa în raport cu un sistem de referinţă galilean va fi inferioară lui 1, deoarece, conform §12, corpurile în mişcare suferă o contracţie în sensul mişcării. Dacă, dimpotrivă, el va aşeza aceeaşi riglă pe direcţia razei discului, atunci aceasta, raportată la *K,* nu va suferi nici o scurtare. Dacă observatorul va măsura cu rigla sa mai întâi circumferinţa discului si apoi diametrul lui si dacă va împărţi cele două rezultate ale măsurătorii unul la altul, atunci el nu va găsi ca rezultat cunoscutul număr u = 3,14..., ci un număr mai mare*, în timp ce pentru un disc imobil în raport cu *K* se va obţine, natural, prin aceeaşi operaţie, exact numărul TC. S-a demonstrat astfel că teoremele geometriei euclidiene nu sunt valabile riguros pentru discuri aflate în rotaţie şi, implicit, în general într-un câmp

* în tot acest raţionament trebuie să folosim sistemul *K* galilean (nu cel în rotaţie) drept sistem de coordonate, deoarece numai în raport cu *K* trebuie să admitem ca valabile rezultatele teoriei speciale a relativităţii (în raport cu *K'* domneşte un câmp gravitaţional).

gravitațional, cel puțin în cazul în care îi atribuim riglei lungimea l fără a ține seama nici de poziția si nici de orientarea sa. Noțiunea de linie dreaptă îşi pierde astfel semnificația. Nu vom putea deci defini exact coordonatele *x, y, z* în raport cu discul după metoda folosită în teoria specială a relativității. Totuşi, atâta vreme cât nu s-a definit ce înțelegem prin coordonatele spațiale şi momentele temporale ale evenimentelor, nici legile naturii în care apar aceste indicații de coordonate n-au o semnificație exactă.

Toate raționamentele expuse până acum privind teoria generală a relativității par a fi puse astfel sub semnul întrebării. De fapt, este suficient să folosim un expedient subtil pentru a putea aplica corect postulatul relativității generale. Pentru aceasta cititorul va fi pregătit prin considerațiile ce vor urma.

§24. Continuul euclidian si neeuclidian

Să considerăm suprafața unei mese de marmură. Din oricare punct al mesei eu pot ajunge la oricare alt punct al acesteia deplasându-mă de un mare număr de ori spre un punct întotdeauna „vecin" sau, în alți termeni, mergând din punct în punct, fără „salturi". Ce se înțelege prin „vecin" si prin „salturi" va fi, desigur, înțeles de cititor cu suficientă precizie (cu condiția ca el să nu fie prea exigent). Vom exprima aceasta spunând că suprafața este un continuu.

Să ne imaginăm apoi că, pentru „acoperirea" mesei, dispunem de un mare număr de bastonaşe de aceeaşi lungime. Prin aceasta trebuie să înțelegem că putem face să coincidă extremitățile acestor bastonaşe două câte două. Să plasăm deci patru asemenea bastonaşe pe suprafața mesei, astfel încât extremitățile lor să formeze un patrulater cu diagonalele de aceeaşi lungime (un pătrat); ne vom servi de un bastonaş de probă pentru a obține egalitatea diagonalelor. Să alăturăm acestui pătrat alte pătrate egale, care să aibă în comun cu el un bastonas, acestora din urmă să le alăturăm alte asemenea pătrate ş.a.m.d. In cele din urmă, întreaga masă va fi acoperită cu pătrate, astfel încât fiecare latură a unui pătrat să fie comună pentru două pătrate, iar fiecare colț al unui pătrat să fie comun pentru patru pătrate.
Este o adevărată minune că putem face această operație fără a întâmpina cele mai mari dificultăți. E suficient să ne gândim doar la următoarele. Dacă într-un colț comun construim trei pătrate, am şi trasat două laturi ale celui de-al patrulea pătrat. Modul în care vor fi construite celelalte două laturi ale lui este astfel complet determinat, aşa încât eu nu mai pot modifica acest patrulater pentru a-i face diagonalele egale. Dacă ele sunt de la sine egale, înseamnă că masa si bastonaşele posedă o proprietate specială de care nu pot decât să mă minunez. Dacă construcția reuşeşte, vom vedea şi alte minuni de acest gen.

Dacă într-adevăr totul decurge normal, voi spune că punctele mesei formează un continuu euclidian în raport cu bastonaşele utilizate. Dacă voi alege un colţ al pătratului drept „origine", voi putea determina celelalte colturi ale pătratului în raport cu acest punct cu ajutorul a două numere. Nu e nevoie decât să precizez câte bastonaşe trebuie să aşez la „dreapta" şi câte în „sus" plecând de la punctul de origine pentru a ajunge la vârful avut în vedere. Aceste două numere reprezintă „coordonatele carteziene" ale acestui punct în raport cu „sistemul de coordonate cartezian" definit de aceste bastonaşe.
S-ar putea ca, în unele cazuri, această experienţă să nu reuşească, după cum putem vedea din următoarea modificare a experimentului ideal. Să presupunem că, sub influenţa creşterii temperaturii, bastonaşele se „dilată" şi că masa va fi încălzită în centrul ei, nu si la periferie, astfel încât în orice loc al mesei extremităţile a două dintre bastonaşele noastre se păstrează cap la cap. Construcţia noastră de pătrate va trebui astfel să fie necesarmente deranjată, deoarece bastonaşele din centrul mesei se vor dilata, în timp ce cele de la margine îşi vor menţine lungimea.
Suprafaţa mesei nu mai constituie un continuu euclidian în raport cu bastonaşele noastre (definite ca unităţi de măsură), iar noi nu mai suntem în situaţia de a defini imediat cu ajutorul lor coordonatele carteziene, deoarece construcţia precedentă nu mai poate fi realizată. Dar, întrucât

există alte obiecte care nu sunt influențate în același mod ca bastonaşele (sau nu sunt deloc influențate) de temperatura mesei, am putea reține, în mod natural, concepția după care suprafața mesei constituie un „continuu euclidian"; acesta se obține în mod satisfăcător cu ajutorul unor convenții mai subtile asupra măsurătorilor, adică a comparării lungimilor.

Dar dacă, sub influența temperaturii, bastonaşele de orice fel, adică din orice material, se vor comporta *la fel* pe suprafața mesei supuse unor temperaturi variabile şi dacă, pentru a constata acțiunea temperaturii, nu vom avea alt mijloc decât comportamentul geometric al bastonaşelor în experiențe analoge cu cea descrisă mai sus, am putea atribui distanța l depărtării dintre două puncte de pe masă atunci când ele coincid cu extremitățile unuia dintre bastonaşele noastre; cum am putea defini altfel nearbitrar o distanță? Dar atunci trebuie să abandonăm metoda coordonatelor carteziene şi s-o înlocuim cu alta care nu mai presupune validitatea geometriei euclidiene pentru corpurile rigide.* Cititorul observă că situația

* Problema noastră s-a pus matematicienilor în forma următoare. Fiind dată o suprafață, de exemplu un elipsoid, în spațiul euclidian tridimensional, există pe această suprafață o geometrie cu două dimensiuni la fel ca în plan. Gauss si-a pus problema de a căuta principiile acestei geometrii cu două dimensiuni fără a se folosi de ideea că respectiva suprafață aparține unui continuu euclidian cu trei dimensiuni. Dacă pe această suprafață se imaginează construcții cu ajutorul

expusă aici seamănă foarte mult cu cea pe care a adus-o cu sine postulatul general al relativității.

§25. Coordonate gaussiene

Iată cum a tratat Gauss această problemă din punct de vedere analitic-geometric. Să ne imaginăm pe suprafața mesei un sistem de curbe oarecare (vezi fig. 4), pe care le vom desemna prin *u* şi le vom caracteriza pe fiecare printr-un număr, în desen sunt reprezentate curbele *u* = \, *u* = 2 şi *u* = 3. între curbele *u* = l şi *u - 2* trebuie să ne imaginăm un număr infinit de curbe corespunzând tuturor numerelor reale cuprinse între l şi 2. Avem astfel un sistem de curbe *u* infinit apropiate pe toată suprafața mesei. Nici o curbă *u* nu trebuie să intersecteze o altă asemenea curbă; prin orice punct de pe suprafață trece una si numai una dintre aceste curbe. Astfel, fiecărui punct de pe suprafața tablei îi corespunde o valoare bine determinată a lui *u. Să ne* imaginăm de asemenea un sistem de bastonaşelor rigide (analoge cu cele realizate pe suprafața mesei), ele vor satisface alte legi decât cele ale geometriei euclidiene a planului. Această suprafață nu constituie un continuu euclidian în raport cu bastonaşele si pe ea nu se pot defini coordonatele carteziene. Gauss a arătat după ce principii putem trata relațiile geometrice pe această suprafață, deschizând astfel calea geometriei lui Riemann a continuurilor neeuclidiene pluridimensionale. De aceea matematicienii au rezolvat deja de multă vreme problemele formale la care conduce postulatul general al relativității.

curbe *v,* ce satisfac aceleaşi condiţii, cărora le corespund numere în acelaşi mod, si care ar putea fi oricum formate. Fiecărui punct al suprafeţei mesei îi va corespunde atunci o valoare a lui *u* si una a lui *v,* numere pe care le vom numi *coordonate* (coordonate *gaussiene).* De exemplu, punctul P reprezentat în figură are drept coordonate gaussiene *u* = 3, v = 1. Două puncte vecine P şi P' de pe suprafaţă corespund coordonatelor

si

P: *u; v*

P': u + du; v + dv,

unde *du* şi *dv* reprezintă numere foarte mici. Fie ds numărul foarte mic reprezentând distanţa măsurată cu o riglă gradată dintre P si P'. După Gauss,

$ds^2 = g_n du^2 + 2g_{l2} dudv$

unde g_{n}, g_{u}, g_{22} reprezintă mărimi ce depind într-o modalitate precisă de *u* şi *v*. Mărimile g_{n}, g_{12}, *822* determină comportamentul bastonaşelor în raport cu curbele *u* si *v* şi ca urmare în raport cu suprafața mesei, în cazul în care punctele suprafeței considerate constituie un continuu euclidian în raport cu bastonaşele de măsură, dar numai în acest caz, e posibil să alegem curbele *u* şi *v* şi să le atribuim numere astfel încât să avem, simplu,

$ds^2 = du^2 + dv^2$.

In acest caz curbele *u* si *v* sunt linii drepte în sensul geometriei euclidiene, linii ortogonale. Atunci coordonatele gaussiene sunt, simplu, coordonate carteziene. Coordonatele gaussiene, după cum se observă, nu sunt decât două numere atribuite fiecărui punct de pe suprafață în aşa fel încât la două puncte vecine în spațiu corespund valori foarte puțin diferite ale coordonatelor.

Aceste considerații se aplică mai întâi unui continuu bidimensional. Dar metoda gaussiană se poate aplica şi unui continuu cu trei, patru sau mai multe dimensiuni. Să considerăm, de exemplu, un continuu cvadridimensional; vom pune în corespondență fiecărui punct al continuului în mod arbitrar patru numere x_{lf} x_2, x_3, J_4, care vor fi numite „coordonate". Punctelor vecine *le* vor corespunde valori ale coordonatelor vecine. Dacă am definit fizic distanța a două puncte vecine P şi P' şi dacă ştim cum s-o măsurăm, vom avea formula

unde mărimile g_n etc. au valori ce variază după locul din continuu. Numai în cazul în care continuul este euclidian e posibil să punem în corespondență punctelor continuului coordonatele x_v x_2, x_3, x *ț*, astfel încât vom avea simplu:
ds^2 =
^{2} + *dxț* + dx^2 +
Atunci în continuul cvadridimensional sunt valabile relații analoge cu cele pe care le satisfac măsurările în continuul nostru tridimensional. Reprezentarea gaussiană pentru ds^2 nu este totuşi posibilă decât dacă putem considera drept continuuri euclidiene domenii suficient de mici ale continuului studiat. Aceasta se întâmplă evident în cazul mesei şi al temperaturii variabile în funcție de loc. Deoarece pentru o parte mică a mesei temperatura este practic constantă, iar bastonasele se comportă geometric aproape conform regulilor geometriei euclidiene. Dificultatea construirii pătratelor din paragraful precedent nu va mai apărea decât atunci când această construcție se va extinde asupra unei părți considerabile a mesei.
în rezumat, putem spune: Gauss a descoperit o metodă pentru studiul matematic al continuurilor oarecare, în care se definesc relațiile metrice („distanța" punctelor vecine). Fiecărui punct al continuului îi vor corespunde atâtea numere (coordonate gaussiene) câte dimensiuni are continuul. Această

corespondentă trebuie să fie univocă şi de o asemenea natură încât punctelor vecine să le corespundă numere infinit de puțin diferite (coordonate gaussiene). Sistemul de coordonate gaussian este o generalizare logică a sistemului de coordonate cartezian. El este aplicabil si continuurilor neeuclidiene, dar numai atunci când mici părți ale continuului studiat în raport cu măsura definită („distanța") pot fi considerate ca euclidiene cu o aproximație cu atât mai mare, cu cât partea considerată a continuului este mai mică.

§26. **Continuul spațio-temporal al teoriei speciale a relativității — continuu euclidian**

.

Acum suntem în măsură să expunem cu mai multă precizie ideile lui Minkowski indicate doar sumar în §17. Conform teoriei speciale a relativității anumite sisteme de coordonate, pe care le-am numit „sisteme de coordonate galileene", joacă un rol special în descrierea continuului cvadridimensional spațio-temporal. Pentru ele, cele patru coordonate x, y, z, t, care determină un eveniment sau, altfel spus, un punct al continuului cvadridimensional, sunt definite fizic într-un mod simplu, aşa cum s-a arătat pe larg în prima parte a acestei lucrări. Pentru trecerea de la un sistem galilean la altul aflat în mişcare uniformă în raport cu el sunt valabile ecuațiile transformării Lorentz care formează baza pentru derivarea consecințelor teoriei speciale a

relativității şi nu reprezintă, la rândul lor, decât expresia valabilității universale a legii propagării luminii pentru toate sistemele de referință galileene.

Minkowski a descoperit că transformarea Lorentz satisface următoarele condiții simple. Să considerăm două evenimente vecine, a căror poziție relativă e dată în continuul cvadridimensional prin diferențele de coordonate spațiale *dx,* dy, dz si prin diferența de timp *dt* în raport cu un sistem de referință galilean *K.* In raport cu un al doilea sistem galilean, diferențele analoge pentru aceste două evenimente vor fi *dx', dy', dz', dt'.* Atunci aceste mărimi vor satisface mereu condiția

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2dt^2 = dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 - c^2dt'^2.$$

Aceste condiții au drept consecință validitatea transformării Lorentz. Putem spune şi astfel: mărimea

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2dt^2$$

relativă la două puncte vecine ale continuului cvadridimensional spatiu-timp îşi conservă aceeaşi valoare pentru toate sistemele de referință preferențiale (galileene). Dacă se înlocuiesc *x, y, z,* $J\^\backslash_c t$ prin

J_1, x_2, x_3, J_4 se observă că măsura

$$ds^2 = dx^2 + dx^2, + dx^2, + dx\backslash$$

este independentă de alegerea sistemului de referință. Vom numi mărimea ds „distanța" celor două evenimente sau puncte cvadridimensionale.

Dacă în locul variabilei reale *t* se alege ca variabilă temporală variabila imaginară *<J~^îct* se poate, conform teoriei speciale a relativității, considera continuul spațio-temporal ca un continuu „euclidian" cvadridimensional, aşa cum a rezultat din raționamentele din paragraful anterior.

§27. **Continuul spațio-temporal al teoriei generale a relativității nu este un continuu euclidian**

In prima parte a acestei lucrări am putut utiliza coordonate spațiale şi temporale susceptibile de o interpretare fizică simplă şi directă şi care, după §26, pot fi interpretate drept coordonate carteziene cu patru dimensiuni. Acest lucru era posibil pe baza legii constanței vitezei luminii în vid, pe care însă, conform §21, teoria generală a relativității nu o mai acceptă; am ajuns, dimpotrivă, la rezultatul după care, conform teoriei generale a relativității, viteza luminii trebuie să depindă mereu de coordonate, atunci când e prezent un câmp gravitațional. Am găsit apoi, în §23 pe un caz particular, că prezența unui câmp gravitațional face imposibilă acea definire a coordonatelor şi a timpului care ne-a condus la realizarea obiectivului în teoria specială a relativității.

Date fiind aceste rezultate, ajungem la convingerea că, după teoria generală a relativității, continuul spațio-temporal nu mai poate fi înțeles ca un continuu euclidian, ci că aici ne aflăm în ca-

zul general pe care 1-am întâlnit deja pentru continuul bidimensional al suprafeţei mesei si al temperaturii variabile. Aşa cum acolo nu era posibil să se construiască din bastonaşe egale un sistem de coordonate cartezian, la fel si aici e imposibil să construim din corpuri rigide şi ceasornice un sistem (sistem de referinţă) în aşa fel încât etaloanele de lungime şi ceasornicele rigid legate între ele să indice în mod direct poziţia şi timpul. Aceasta este dificultatea pe care am întâlnit-o în §23.
Explicaţiile din §25 si §26 ne indică însă calea de urmat pentru depăşirea acestei dificultăţi. Raportăm într-un mod arbitrar continuul spaţio-temporal cvadridimensional la coordonatele gaussiene. Vom face să corespundă fiecărui punct al continuului patru numere $x_{lf} x_2$, x_3, x_4 (coordonate) care nu posedă o semnificaţie fizică nemijlocită, ci servesc numai la numerotarea punctelor continuului într-o anume modalitate arbitrară. Această corespondentă nu trebuie să fie în mod necesar de aşa natură încât $x_{lf} x_2$, x_3 să reprezinte „coordonate spaţiale", iar x_4 „coordonata temporală".
Cititorul ar putea crede că o asemenea descriere a lumii este cu totul insuficientă. De ce să se atribuie unui eveniment coordonatele determinate x_v x_2, x_3, *Xţ,* dacă aceste coordonate n-au nici o semnificaţie? La o examinare mai atentă se observă însă că această întrebare nu este întemeiată. Să considerăm, de exemplu, un punct material oarecare în mişcare. Dacă acesta ar avea doar o existenţă momentană, lipsită de durată, atunci el ar putea

fi descris spațio-temporal printr-un singur sistem de valori x_v x_2, x_3, x_4. Existența sa durabilă poate fi caracterizată printr-un număr infinit de mare de sisteme de valori (ale căror coordonate diferă infinit de puțin unele de altele), punctele fiind foarte apropiate între ele; punctului material îi va corespunde deci o linie (unidimensională) într-un continuu cvadridimensional. Mai multor puncte în mişcare le vor corespunde de asemenea astfel de linii în continuul nostru. Numai propozițiile referitoare la aceste puncte, care pot pretinde realitatea fizică, sunt realmente propoziții asupra coincidenței acestor puncte. O asemenea coincidență se manifestă în reprezentarea noastră matematică prin faptul că cele două linii reprezentând mişcările respective ale acestor două puncte au comun un anumit sistem de valori de coordonate x_{lr} x_2, x_3, x_4. Cititorul va admite desigur după o anumită reflecție că asemenea coincidente sunt, de fapt, singurele constatări reale cu caracter spatio-temporal pe care le întâlnim în enunțurile fizice.
Când am descris mai înainte mişcarea unui punct material fată de un sistem de referință nu am indicat altceva decât coincidențele acestui punct cu puncte determinate ale sistemului de referință. Indicațiile de timp rezultă si ele din constatarea coincidenței corpurilor cu ceasornice, legată de constatarea coincidentei indicatoarelor ceasornicelor cu puncte determinate de pe cadran. La fel se petrec lucrurile cu măsurările lungimilor cu etaloane, cum poate rezulta după o mică reflecție.

In general, orice descriere fizică se descompune într-un număr de propoziţii, fiecare dintre ele raportându-se la coincidenţa spaţio-temporală a două evenimente A şi B. Orice asemenea propoziţie se exprimă în coordonate gaussiene prin concordanta celor patru coordonate x_1, x_2, x_3, x_4. Descrierea continuului spaţio-temporal prin coordonate gaussiene înlocuieşte de fapt în mod complet descrierea cu ajutorul unui sistem de referinţă, fără a mai prezenta neajunsurile acestei ultime metode; ea nu mai este legată de caracterul euclidian al continuului pe care-l reprezintă.

§28. Formularea exactă a principiului general al relativităţii

Acum suntem în situaţia de a înlocui formularea provizorie din §18 a principiului general al relativităţii printr-una exactă. Forma adoptată atunci: „Toate sistemele de referinţă *K, K'* etc. sunt echivalente pentru descrierea naturii (formularea legilor generale ale naturii), oricare ar fi starea lor de mişcare" nu mai poate fi păstrată, deoarece nu mai este posibilă folosirea corpurilor de referinţă rigide pentru descrierea spaţio-temporală, în sensul metodei urmate în teoria specială a relativităţii. Se înlocuieşte sistemul de referinţă prin sistemul de coordonate gaussiene. Ideea principală a principiului general al relativităţii este exprimată de următoarea propoziţie: *Toate sistemele de co-*

ordonate gaussiene sunt principial echivalente pentru formularea legilor generale ale naturii.

Putem enunța acest principiu general al relativității si într-o altă formă, care indică şi mai clar faptul că această propoziție este o generalizare naturală a principiului special al relativității. După teoria specială a relativității, ecuațiile care exprimă legile generale ale naturii se transformă în ecuații de aceeaşi formă atunci când, prin utilizarea transformării Lorentz, în locul variabilelor *x,* y, z, *t* de poziție şi timp ale unui sistem de referință (galilean) *K,* se introduc variabilele *x', y' , z' , t'* ale unui nou sistem de referință *K'* . După teoria generală a relativității, dimpotrivă, aceste ecuații trebuie să se transforme în ecuații de aceeaşi formă printr-o substituție oarecare a variabilelor gaussiene z_v x_2 X_3, x_4, deoarece orice transformare (nu doar transformarea Lorentz) corespunde unei schimbări de coordonate gaussiene.

Dacă nu vrem să renunțăm la intuiția obişnuită tridimensională, vom putea caracteriza dezvoltarea ideilor fundamentale ale teoriei generale a relativității după cum urmează. Teoria specială a relativității se referă la domenii galileene, adică la domenii în care nu există nici un câmp gravitațional. Ca sistem de referință serveşte aici un sistem de referință galilean, adică un corp rigid într-o stare de mişcare astfel aleasă încât în raport cu ea e valabil principiul galilean al mişcării uniforme-rectilinii a punctelor materiale „izolate".

Anumite considerații conduc la raportarea acestor domenii galileene la sisteme de referință care

nu sunt galileene. Există atunci, în raport cu aces-
tea, un câmp gravitațional de un tip particular (§20
si 23).
Dar, în câmpuri gravitaționale nu există corpuri
rigide cu proprietăți euclidiene. Ficțiunea corpu-
rilor de referință rigide eşuează în teoria generală
a relativității. Mersul ceasornicelor este si el influ-
ențat de câmpurile gravitaționale, astfel încât o de-
finiție fizică a timpului cu ajutorul direct al acestor
ceasornice nu are deloc acelaşi grad de evidență
ca în teoria specială a relativității.
De aceea se utilizează corpuri de referință ne-
rigide, care nu numai că se află într-o mişcare oa-
recare, ca orice corp, dar care în timpul mişcării
lor suferă schimbări de formă arbitrare. Pentru a
defini timpul se utilizează ceasornice care funcțio-
nează după orice lege de mişcare, oricât de nere-
gulată, pe care ni le imaginăm fixate fiecare într-un
punct al sistemului de referință nerigid şi care nu
satisfac decât condiția ca indicatoarele simultan
observabile ale ceasornicelor situate în vecinătate
să difere infinitezimal. Aceste corpuri de referin-
ță nerigide, pe care le-am putea numi pe drept cu-
vânt „moluşte de referință", sunt esentialmente
echivalente cu un sistem oarecare de coordonate
gaussiene cu patru dimensiuni. Ceea ce-i conferă
„moluştei" în raport cu sistemul de coordonate ga-
ussian un anume caracter intuitiv este conservarea
din punct de vedere formal (conservare, de fapt,
nejustificată) a existentei proprii a coordonatelor
„spațiale" în raport cu coordonata „temporală".

Fiecare punct al moluştei este considerat un punct în spaţiu, fiecare punct material imobil în raport cu el va fi considerat pur şi simplu ca imobil, atâta vreme cât moluscă va fi luată ca sistem de referinţă. Principiul general al relativităţii cere ca toate aceste moluşte să poată fi întrebuinţate cu egală îndreptăţire şi cu succes egal ca sisteme de referinţă în formularea legilor generale ale naturii; legile trebuie să fie complet independente de alegerea moluştelor.

Tocmai în această limitare drastică impusă legilor naturii constă intuiţia esenţială imanentă principiului general al relativităţii.

§29. Soluţia problemei gravitaţiei pe baza principiului general al relativităţii

Cititorul care a urmărit toate consideraţiile expuse până acum nu va avea nici o dificultate să înţeleagă metoda care va oferi soluţia problemei gravitaţiei.

Vom începe prin a considera un domeniu galilean, adică un domeniu în care nu există câmp gravitaţional în raport cu sistemul de referinţă galilean *K.* Ştim din teoria specială a relativităţii cum se comportă riglele şi ceasornicele în raport cu *K* si de asemenea cum se comportă punctele materiale „izolate"; acestea se mişcă rectiliniu şi uniform.

Să raportăm acum acest domeniu la un sistem de coordonate gaussian oarecare sau mai degra-

bă la o „moluscă" luată ca sistem de referință K'. In raport cu K' există un câmp gravitațional (de un gen particular). Un calcul simplu ne permite să determinăm comportamentul riglelor şi al ceasornicelor precum şi al punctelor materiale în mişcare liberă în raport cu K'. Acest comportament îl vom interpreta ca fiind un comportament al riglelor, ceasornicelor si punctelor materiale, sub influența câmpului gravitațional G. Se va introduce apoi ipoteza după care influența unui câmp gravitațional asupra riglelor, ceasornicelor şi punctelor materiale în mişcare liberă se produce după aceleaşi legi chiar şi atunci când câmpul gravitațional *nu* poate fi derivat prin simple transformări de coordonate din cazul particular galilean.

După aceea se cercetează comportamentul spațio-temporal al unui câmp gravitațional G derivat din cazul galilean special prin simple transformări de coordonate şi se exprimă acest comportament printr-o lege care este mereu valabilă, indiferent de alegerea şi sistemul de referință (moluscă) utilizat pentru descrierea fizică.

Această lege nu este încă legea *generală* a câmpului gravitațional, întrucât câmpul gravitațional studiat, G, este de un tip particular. Pentru a descoperi legea generală a câmpului gravitațional este necesară încă o generalizare a legii astfel obținută; această generalizare este complet determinată dacă se iau în considerație următoarele condiții:

a. Generalizarea căutată trebuie să satisfacă de asemenea principiul general al relativității.

b. Dacă în domeniul considerat există materie, câmpul pe care ea îl produce nu depinde decât de masa sa inerţială şi, ca urmare, conform §15, doar de energia sa.

c. Ansamblul format din câmpul gravitaţional şi masă trebuie să satisfacă legea conservării energiei (sau impulsului).

Finalmente, principiul general al relativităţii ne permite să aflăm influenţa câmpului gravitaţional asupra desfăşurării tuturor acelor procese care în cazul absenţei unui câmp gravitaţional se supun legilor cunoscute, adică a celor deja introduse în cadrul teoriei speciale a relativităţii. Vom urma aici, în principiu, metoda care a fost analizată mai înainte pentru rigle, ceasornice şi puncte materiale în mişcare liberă.

Teoria gravitaţiei dedusă astfel din principiul general al relativităţii nu se distinge doar prin frumuseţea sa; ea nu corijează doar defectul, indicat în §21, pe care-l prezintă mecanica clasică; ea nu explică doar legea experimentală a egalităţii dintre masa inerţială şi masa grea; în plus, ea a explicat deja două rezultate de observaţie ale astronomiei esenţial diferite în faţa cărora mecanica clasică eşua. Al doilea dintre aceste rezultate, şi anume curbarea razelor de lumină de către câmpul gravitaţional al Soarelui, a fost deja amintit. Primul se referă la orbita planetei Mercur.

Dacă se consideră ecuaţiile teoriei generale a relativităţii în cazul special când câmpurile gravitaţionale sunt slabe si toate masele se deplasează

în raport cu un sistem de coordonate cu viteze mici față de viteza luminii, se va obține imediat teoria lui Newton ca primă aproximație; această teorie se obține fără a introduce ipoteze speciale, în timp ce Newton a fost obligat să introducă ipoteza unei forțe de atracție invers proporțională cu pătratul distanței dintre punctele materiale aflate în interacțiune. Dacă se mărește gradul de precizie a calculelor, vor apărea unele abateri de la teoria lui Newton, care scapă însă aproape în întregime observațiilor noastre din cauza micimii lor.

Una dintre aceste abateri va trebui considerată aici în mod special. După teoria lui Newton, o planetă se mişcă în jurul Soarelui pe o elipsă care-şi va păstra permanent poziția în raport cu stelele fixe, dacă se vor putea neglija acțiunea altor planete asupra planetei considerate şi mişcarea proprie a stelelor fixe. Dacă vom face abstracție de aceste două influențe, atunci orbita planetelor va trebui să fie invariabilă în raport cu stelele fixe, în cazul în care teoria lui Newton este exactă. Această consecință testabilă cu o precizie foarte mare s-a confirmat la toate planetele până la planeta cea mai apropiată de Soare, Mercur, cu precizia observațiilor pe care o putem atinge astăzi. Despre planeta Mercur însă noi ştim deja de la Leverrier că elipsa care reprezintă traiectoria sa, corijată în sensul de mai sus, nu este imobilă în raport cu stelele fixe, ci se află într-o mişcare de rotație extraordinar de lentă în planul traiectoriei şi în sensul mişcării de revoluție. Pentru această mişcare de

rotație a elipsei traiectoriei s-a determinat o valoare de 43 secunde de arc pe secol, cu o eroare mai mică de câteva secunde de arc. Explicația acestui fenomen prin mecanica clasică nu poate fi dată decât introducând ipoteze puțin plauzibile şi concepute special în acest scop.

Din teoria generală a relativității rezultă că orice elipsă a planetelor va trebui cu necesitate să se rotească în modul indicat mai sus în jurul Soarelui; la toate celelalte planete cu excepția lui Mercur, această rotație este însă prea mică pentru a putea fi constatată cu precizia măsurătorilor noastre actualmente realizabile; pentru Mercur, ea atinge însă 43 de secunde de arc pe secol, exact aşa cum a fost stabilit pe baza observației.

In plus, din această teorie s-a putut deduce până acum o consecință susceptibilă a fi verificată prin observații, si anume deplasarea spectrului luminii pe care o primim de la stelele uriaşe în raport cu cea produsă pe Pământ în mod analog (adică produsă de acelaşi tip de molecule). Nu mă îndoiesc de faptul că şi această consecință a teoriei va fi curând confirmată.

CONSIDERAȚII ASUPRA UNIVERSULUI CA ÎNTREG

§30. Dificultățile cosmologice ale teoriei newtoniene

în afara dificultății expuse în §21, mecanica cerească clasică întâmpină de asemenea încă o a doua dificultate principială care, după știința mea, a fost discutată pentru prima dată în mod detaliat de astronomul Seeliger. Dacă se studiază cum poate fi considerat universul ca întreg, atunci răspunsul cel mai natural pare a fi următorul: universul este infinit în spațiu (și în timp). Peste tot există stele, astfel încât densitatea materiei, deși este local foarte diferită, global rămâne aceeași, în alți termeni: oricât de departe am călători în spațiu, se vor găsi peste tot răspândite o mulțime de stele fixe, de același tip și aceeași densitate.

Această concepție este incompatibilă cu teoria lui Newton. Teoria sa pretinde mai degrabă că universul are un gen de centru, în care densitatea stelelor este maximă, iar această densitate a stelelor scade pornind din acest centru în afară, pentru a fi înlocuită, la o distanță suficient de mare, de un

spațiu vid infinit. Lumea stelelor ar constitui o insulă finită în oceanul infinit al spațiului.*
Această reprezentare este, în sine, puțin satisfăcătoare. Ea este si mai puțin satisfăcătoare dacă ținem seama de faptul că se ajunge la următoarea consecință: lumina emisă de stele şi stelele izolate de sistemul stelar se vor deplasa constant spre infinit fără a mai reveni vreodată şi fără a mai intra vreodată în interacțiune cu alte obiecte naturale.
Universul materiei aglomerate într-o regiune finită sărăceşte astfel sistematic puțin câte puțin.
Pentru a scăpa de aceste consecințe, Seeliger a modificat legea lui Newton, admițând că atracția a două mase descreşte la distanțe mari mai repede decât arată legea inversului pătratelor distanțelor. Se obține astfel faptul că densitatea medie a materiei este constantă peste tot la infinit, fără ca prin aceasta să rezulte câmpuri gravitaționale infinite. Ne eliberăm astfel de reprezentarea incomodă a unui univers material ce ar poseda necesarmente un gen de centru. Fără îndoială, aceas-

* Justificarea acestei teze: După teoria lui Newton, într-o masă *m* ajunge un anumit număr de „linii de forță" venind de la infinit, număr proporțional cu masa *m*. Dacă densitatea p_0 *a* maselor din univers este constantă în centru, o sferă de volum *V* va închide în medie masa p_0V. Numărul liniilor de forță ce pătrund prin unitatea de suprafață în această sferă este proporțional cu p_0 ^ sau p_0R. Intensitatea câmpului la suprafața sferei va creşte deci la infinit odată cu raza acesteia, ceea ce este imposibil.

ta eliberare de dificultățile principiale schițate aici se plăteşte printr-o modificare şi o complicare a legii lui Newton, care nu pot fi întemeiate nici pe experiență si nici teoretic. S-ar putea imagina un număr de legi care ar oferi acelaşi rezultat fără a putea avea un temei pentru a prefera una dintre ele; deoarece toate aceste legi sunt la fel de puțin întemeiate, ca si legea lui Newton, pe principii generale teoretice.

§31. Posibilitatea unui univers *finit* si totuşi *nelimitat*

Speculațiile cu privire la structura universului s-au orientat si într-o altă direcție, complet diferită. Dezvoltarea geometriei neeuclidiene a condus la ideea că ne-am putea îndoi de *infinitatea* spațiului nostru, fără ca prin aceasta să intrăm în contradicție cu legile gândirii sau cu experiența (Riemann, Helmholtz). Acest lucru a fost expus deja de Helmholtz si Poincare în detaliu si cu o limpezime ce n-ar putea fi depăşită; de aceea aici nu voi încerca decât să schițez sumar problema.

Să ne imaginăm un mediu cu două dimensiuni şi ființe plate cu instrumente plate, în particular cu rigle plate si rigide, în mişcare liberă într-un *plan.* Să presupunem că pentru ele nu există nimic în afara acestui plan şi că mediul plan pe care ele îl observă direct şi prin obiectele lor plate în planul lor este unul cauzal închis. In particular, construcțiile geometriei euclidiene a planului sunt realizabile

cu bastonaşe, de exemplu construcția rețelei pe suprafața mesei, despre care am discutat în §24. Universul acestor ființe este, spre deosebire de universul nostru, bidimensional, dar, ca şi universul nostru, el este infinit în întindere. Pe el au loc un număr infinit de pătrate egale din bastonaşe, cu alte cuvinte, volumul lui (suprafața) este infinit. Are sens ca aceste ființe să spună că universul lor este *„plan",* si anume în sensul că sunt posibile construcțiile geometriei plane euclidiene cu ajutorul bastonaselor, fiecare bastonas reprezentând întotdeauna aceeaşi lungime independent de poziția sa.
Să ne imaginăm apoi un mediu cu două dimensiuni nu pe un plan, ci pe suprafața unei sfere. Ființele plate se află pe acest plan cu rigle şi toate celelalte obiecte ale lor, si nu-l pot părăsi; întreaga lume a experienței lor se limitează aproape exclusiv la suprafața sferei. Ar putea aceste ființe să considere geometria lumii lor ca o geometrie euclidiană bidimensională, iar bastonasele ca expresii ale „distanței în linie dreaptă"? Nu. Deoarece încercând să traseze o linie dreaptă ei vor obține o curbă, pe care o vom desemna în geometria noastră „tridimensională" printr-un cerc mare, adică o curbă închisă de o lungime determinată şi finită pe care o putem măsura cu ajutorul unei rigle. De asemenea, acest univers are o suprafață limitată, care se poate compara cu cea a unui pătrat format din bastonaşe. Acest raționament este extrem de seducător, întrucât el conduce la următoarea idee: *Universul acestor ființe este finit si totuşi nu are limite.*

Dar ființele de pe sferă n-au nevoie să călătorească mult pentru a-şi da seama că ele nu locuiesc într-un univers euclidian. Ele se pot convinge de aceasta pe orice porțiune din lumea lor care nu este foarte mică. Ele vor trasa pornind dintr-un punct în toate direcțiile linii „drepte" (arcuri de cerc în geometria tridimensională) de aceeaşi lungime. Vom desemna prin „cerc" linia care uneşte extremitățile acestor lungimi. Raportul dintre circumferința unui cerc măsurată cu un bastonas si diametrul lui, măsurat cu acelaşi bastonas, este, conform geometriei plane euclidiene, egal cu o constantă TI, care este independentă de diametrul cercului. Pentru acest raport teoria noastră va găsi pe suprafața sferei valoarea

n

adică o valoare inferioară lui TI şi care se îndepărtează cu atât mai mult de TC cu cât raza *r* a cercului în raport cu raza R a „universului sferic" considerat va fi mai mare. Din această relație ființele de pe sferă pot să deducă raza *R a* universului lor, chiar dacă ele nu au la dispoziție pentru măsurători decât o parte relativ mică din sfera lor. Dar dacă această parte este prea mică, ele nu mai pot să constate că se află într-un univers sferic si nu într-un plan euclidian; o parte mică a suprafe-

tei unei sfere se distinge puțin de partea echiva-
lentă a unui plan.
Astfel, dacă ființele universului sferic ar locui pe
o planetă al cărei sistem solar n-ar cuprinde decât
o porțiune infinit mică a universului sferic, ele n-ar
avea posibilitatea să decidă dacă locuiesc într-o
lume finită sau infinită, întrucât porțiunea de uni-
vers accesibilă experimentelor lor este, în ambele
cazuri, practic un plan, respectiv unul euclidian.
Intuiția ne arată imediat că pentru aceste ființe cir-
cumferința cercului creste odată cu raza până la
„limita universului", pentru ca apoi, odată cu
creşterea în continuare a razei, aceasta să descreas-
că treptat până la zero. Suprafața cercului va creş-
te atunci mereu, până când ea va deveni egală cu
suprafața totală a întregului univers sferic.
Cititorul s-ar putea mira de faptul că am plasat
ființele noastre pe o sferă şi nu pe o altă suprafa-
ță închisă. Acest fapt îşi are justificarea în aceea că
sfera se distinge în raport cu toate celelalte supra-
fețe închise prin proprietatea de a avea toate punc-
tele echivalente. Raportul dintre circumferința *u*
a unui cerc şi raza sa va depinde de raza sa *r;* dar,
pentru o valoare dată a lui *r,* el este acelaşi pen-
tru toate punctele suprafeței sferei; universul sfe-
ric constituie o „suprafață de curbură constantă".
Există un analog tridimensional pentru acest uni-
vers sferic bidimensional, spațiul sferic tridimen-
sional pe care 1-a descoperit Riemann. Punctele lui
sunt de asemenea toate echivalente. El posedă un
volum finit, depinzând de „raza" sa R $(2n^2R^3)$. Ne

putem oare reprezenta un spațiu sferic? A ne reprezenta un spațiu înseamnă a ne reprezenta un ansamblu de experiențe „în spațiu", adică de experiențe pe care le-am putea realiza prin mişcarea corpurilor „rigide". In acest sens, poate fi reprezentat spațiul sferic.
Dintr-un punct vom trasa linii drepte în toate direcțiile (utilizând sfori) şi vom pune pe fiecare dintre ele aceeaşi lungime *r* cu rigla de măsură. Toate extremitățile acestor lungimi se vor afla pe suprafața unei sfere. Putem să măsurăm suprafața acestei sfere (F) cu pătrate ale căror laturi sunt egale cu rigla. Dacă universul este euclidian, atunci $F = nr^2$. Dacă universul este sferic, atunci F va fi mereu mai mic decât nr^2. *F* creşte odată cu creşterea lui *r* de la zero până la un maximum determinat de „raza universului", iar pentru creşterea ulterioară a razei sferei *r* va descreşte din nou până la zero. Liniile drepte radiale ce pornesc dintr-un punct de origine se vor îndepărta din ce în ce mai mult unele de altele, după aceea se vor apropia din nou, pentru ca în final să conveargă la „polul" punctului de origine; ele au măsurat, în toată întinderea sa, spațiul sferic. Ne putem convinge uşor că spațiul sferic tridimensional este complet analog celui bidimensional (suprafața unei sfere). El este finit (adică de volum finit), fără a avea limite.
Să observăm că există şi un tip degenerat de spațiu sferic, „spațiul eliptic". El poate fi conceput ca un spațiu sferic în care punctele polare sunt iden-

tice (nu pot fi distinse). Un univers eliptic ar putea fi atunci considerat, într-un anumit sens, un univers sferic simetric centrat.
Din cele spuse până acum rezultă că ne putem imagina spații închise care nu au limite. Printre acestea, spațiul sferic (sau eliptic) se distinge prin simplitatea sa, întrucât toate punctele sale sunt echivalente. Pentru fizicieni şi astronomi se pune astfel întrebarea extrem de interesantă de a afla dacă universul în care ne aflăm noi este infinit sau finit în genul universului sferic. Experiența nu este suficientă pentru a răspunde la această întrebare; dar teoria generală a relativității permite să răspundem cu o certitudine relativă; ea oferă de asemenea şi soluția la dificultatea enunțată în §30.

§32. **Structura spațiului conform teoriei generale a relativității**

Conform teoriei generale a relativității, proprietățile geometrice ale spațiului nu sunt independente, ci depind de materie. De aceea nu putem spune nimic despre structura geometrică a universului dacă nu se presupune cunoscută starea materiei. Experiența ne-a învățat că, prin alegerea convenabilă a sistemului de coordonate, vitezele stelelor sunt mici în raport cu viteza de propagare a luminii. De aceea, într-o primă aproximație, putem cunoaşte în mare constituția universului considerând materia imobilă.

Ştim deja din explicaţiile anterioare că riglele şi ceasornicele sunt influenţate în comportamentul lor de câmpurile gravitaţionale, cu alte cuvinte de distribuţia materiei. Din aceasta decurge că, în universul nostru, nu se poate pune problema validităţii exacte a geometriei euclidiene. Dar ne putem imagina că universul nostru diferă puţin de un univers euclidian; această idee se justifică prin aceea că, prin calcul, se poate arăta influenţa extrem de redusă a maselor asupra metricii spaţiului înconjurător, chiar dacă masele ar avea mărimea Soarelui. Ne-am putea imagina că, din punct de vedere geometric, se comportă ca o suprafaţă de curbură neregulată în detaliu, dar care nu diferă nicăieri prea mult de un plan, de exemplu ca suprafaţa unei mări ondulate de mici valuri. Am putea numi pe bună dreptate acest univers un „univers cvasi-euclidian". El ar fi spaţial infinit. Calculul ne arată însă că într-un univers cvasi-euclidian densitatea medie a materiei trebuie să fie nulă. Un asemenea univers n-ar putea fi populat peste tot cu materie; el ne-ar oferi imaginea nesatisfăcătoare pe care am schiţat-o în §30.

Dar universul nu este cvasi-euclidian dacă densitatea medie a materiei diferă oricât de puţin de zero. Calculul ne arată, dimpotrivă, că el va fi necesarmente sferic (sau eliptic), dacă materia ar prezenta o densitate uniformă, întrucât în realitate materia nu este repartizată uniform, universul real nu prezintă în mod riguros proprietăţile unui uni-

vers sferic; el trebuie să fie cvasisferic. Dar el va trebui în mod necesar să fie finit. Teoria oferă chiar o corelație simplă între întinderea universului în spațiu si densitatea medie a materiei.*

* Pentru raza *R a* universului se obține ecuația jR^2 = —.
rt rCr
Luând sistemul C.G.S., - = 1,08 • IO^{27}; *p* este densitatea medie a materiei.

CUPRINS

Partea a doua
DESPRE TEORIA GENERALĂ A RELATIVITĂȚII

Redactor
VLAD ZOGRAF1
Tehnoredactor
LUMINIȚA SIMIONESCU
Corector
MĂRIA NICOLAU
Apărut 2005
BUCUREȘTI - ROMÂNIA
Tiparul executat la „UNIVERSUL" S.A.

1905 a fost un an miraculos pentru ştiinţă. Albert Einstein publică trei lucrări: una ţinând încă de domeniul fizicii clasice (în care dă o descriere a mişcării browniene), o alta despre efectul fotoelectric (şi care avea să stea la baza dezvoltării ulterioare a mecanicii cuantice) şi, în fine, articolul apărut în *Zeitscbrift ftir Physik,* „Asupra electrodinamicii corpurilor în mişcare", actul de naştere al teoriei relativităţii. Unsprezece ani mai târziu, Einstein lărgeşte cadrul iniţial al teoriei (relativitatea restrânsă) într-o descriere care include şi câmpul gravitaţional (relativitatea generală) şi care modifică încă mai violent percepţia comună asupra realităţii.

In 1917, Einstein publică singura sa lucrare în care prezintă publicului larg ideile ce stau la baza recentelor sale rezultate: *Teoria relativităţii pe înţelesul tuturor.* Cartea, remarcabilă prin simplitate şi claritate, e mărturia capacităţii lui Einstein de a privi lumea fără idei ştiinţifice preconcepute şi de a ajunge până la esenţa ultimă a lucrurilor, în punctul în care intuiţia încearcă să surprindă principiile fizicii, iar imaginaţia construieşte experimente mintale sugestive. *Teoria relativităţii pe înţelesul tuturor* e o mărturie excepţională pentru fizicieni şi, în acelaşi timp, laboratorul gândirii lui Einstein în care pot pătrunde şi cei neiniţiaţi.

I 04164

Î3QOO[))

13.00

ISBN 973-50-1068-2

5"948353"006650"